

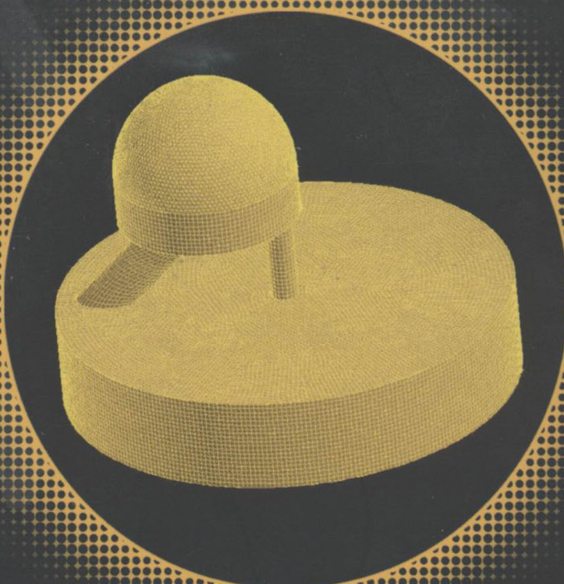
CAD/CAM/CAE工程应用丛书 ANSYS系列

FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通

◎周俊波 刘洋 等编著

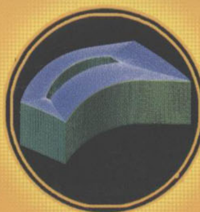
本书核心内容包含

- 流体力学基础
- 流体流动分析软件概述
- FLUENT 6.3的使用
- 网格生成软件GAMBIT
- Tecplot软件使用入门
- UDF使用简介
- 湍流模型模拟
- 多相流模型模拟
- 滑移网格模型模拟
- 动网格模型模拟
- 物质运输和有限速率化学反应模型模拟
- 并行计算
- FLUENT 6.3综合应用实例





附赠超值DVD光盘
视频操作+范例素材







机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



VISIT…

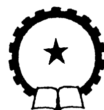
LANZAROTE

Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通

周俊波　刘　洋　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书共分 13 章，分别介绍了流体力学基础、流体流动分析软件概述、FLUENT 6.3 的使用、网格生成软件 GAMBIT、Tecplot 软件使用入门、UDF 使用简介、湍流模型模拟、多相流模型模拟、滑移网格模型模拟、动网格模型模拟、物质运输和有限速率化学反应模型模拟、并行计算和 FLUENT 6.3 综合应用实例等知识。

本书可作为科研院所流体力学研究人员，流体力学相关专业硕士、博士研究生及流体力学相关专业本科高年级学生的自学指导书或参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通 / 周俊波等编著. —北京：机械工业出版社，2011.10
（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）
ISBN 978-7-111-36022-3

Ⅰ. ①F…　Ⅱ. ①周…　Ⅲ. ①流体力学－工程力学－计算机仿真－应用软件，Fluent 6.3　Ⅳ. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 202081 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
责任编辑：张淑谦　李　宁
责任印制：杨　曦

北京双青印刷厂印刷

2012 年 1 月第 1 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 21 印张 • 515 千字
0001－3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-36022-3
　　　　　ISBN 978-7-89433-181-6（光盘）
定价：59.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务
社服务中心：（010）88361066
销售一部：（010）68326294
销售二部：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版



前　言

计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）是 20 世纪 60 年代伴随计算机技术迅速崛起的一门新型独立学科。它建立在流体动力学以及数值计算方法的基础上，以研究物理问题为目的，通过计算机数值计算和图像显示方法，在时间和空间上定量地描述流场数值解。

经过半个世纪的迅猛发展，各种 CFD 通用性软件包陆续出现，成为解决各种流体流动与传热问题的强有力的工具，并作为一种商品化软件为工业界广泛接受。随着其性能日趋完善以及应用范围的不断扩大，如今 CFD 技术早已超越了传统的流体机械与流体工程等应用范畴，成功应用于航空、航运、海洋、环境、水利、食品、化工、核能、冶金、建筑等诸多领域。

实验研究、理论分析和数值模拟是研究流体运动规律的 3 种基本方法，它们是相互依赖、相互促进的。计算流体力学的兴起促进了流体力学的发展，改变了流体力学研究工作的状况，很多原来认为很难解决的问题，如超声速、高超声速钝体绕流、分离流以及湍流问题等，都有了不同程度的发展，而且为流体力学研究工作提供了新的前景。

计算流体力学的兴起促进了实验研究和理论分析方法的发展，为简化流动模型的创建提供了更多的依据，使很多分析方法得到了发展和完善。更重要的是，计算流体力学采用独有的、新的研究方法——数值模拟方法，研究流体运动的基本物理特性，其特点如下。

（1）给出流体运动区域内的离散解，而不是解析解，这区别于一般理论分析方法。

（2）它的发展与计算机技术的发展直接相关。这是因为可能模拟的流体运动的复杂程度、解决问题的广度和能模拟的流体运动的复杂程度，都与计算机速度、内存等直接相关。

（3）若物理问题的数学提法（包括数学方程及其相应的边界条件）是正确的，则可在较广泛的流动参数（如马赫数、雷诺数、气体性质、模型尺度等）范围内研究流体力学问题，且能给出流场参数的定量结果。

以上这些是风洞实验和理论分析难以做到的。然而，要创建正确的数学方程还必须与实验研究相结合。另外，严格的稳定性分析、误差估计和收敛性理论的发展还跟不上数值模拟的进展。所以，在计算流体力学中，仍必须依靠一些较简单的、线性化的、与原问题有密切关系的模型方程的严格数学分析，给出所求解问题数值解的理论依据。依靠数值实验、地面实验和物理特性分析，验证计算方法的可靠性，从而进一步改进计算方法。

FLUENT 是通用 CFD软件包，从 1975 年在谢菲尔德大学（UK）开发出 tempest（FLUENT 的原形）到 1988 年 FLUENT 公司成立，再到 2006 年被 ANSYS 公司收购，期间 FLUENT 公司收购了同领域的 FDI 公司和 polyflow 公司，使其功能不断得到扩充和发展。

FLUENT 用来模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动。由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术，所以 FLUENT 能达到最佳的收敛速度和求解精度。灵活的非结构化网格和基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型，使 FLUENT 在转捩与湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工、燃料电



池等方面有广泛应用。

FLUENT 的软件设计基于 CFD 软件群的思想，从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，FLUENT 软件采用不同的离散格式和数值方法，以期在特定的领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合，从而高效率地解决各个领域的复杂流动计算问题。基于上述思想，FLUENT 公司开发了适用于各个领域的流动模拟软件，这些软件能够模拟流体流动、传热传质、化学反应和其他复杂的物理现象，软件之间采用了统一的网格生成技术及共同的图形界面，而各软件之间的区别仅在于应用的工业背景不同，因此大大方便了用户。

FLUENT 同传统的 CFD 计算方法相比，具有以下的优点：

（1）稳定性好，FLUENT 经过大量算例考核，同实验符合较好。

（2）适用范围广，FLUENT 含有多种传热燃烧模型及多相流模型，可应用于从可压到不可压、从低速到高超声速、从单相流到多相流、化学反应、燃烧、气固混合等几乎所有与流体相关的领域。

（3）精度提高，可达二阶精度。

本书共分 13 章，分别介绍了流体力学基础、流体流动分析软件概述、FLUENT 6.3 的使用、网格生成软件 GAMBIT、Tecplot 软件使用入门、UDF 使用简介、湍流模型模拟、多相流模型模拟、滑移网格模型模拟、动网格模型模拟、物质运输和有限速率化学反应模型模拟、并行计算和 FLUENT 综合应用实例等知识。

全书实例丰富，讲解精辟。随书光盘包含全书所有实例的源文件和操作过程录音讲解视频动画，可以帮助读者学习本书。

本书得到“北京化工大学教材建设基金”的资助，主要由北京化工大学的周俊波教授和刘洋博士编写。另外，参加编写的还有王文平、谷德桥、张俊生、孟清华、周冰、董伟、王兵学、王渊峰、郑长松、王敏、王艳池、赵黎、李磊、罗娟、陈丽芹、王玉秋、李世强、王佩楷、袁涛、董荣荣、刘昌丽、康士廷、胡仁喜、张日晶、路纯红、陈猛、吴高阳、贾长治。由于编者水平有限，写作时间仓促，书中难免有不妥、疏漏之处，欢迎广大读者发电子邮件到编者信箱win760520@126.com，对本书提出批评和建议，以便做进一步修改和补充。

编　者



目　　录

前言
第 1 章　流体力学基础 ······ 1
1.1　流体力学基本概念 ······ 1
1.1.1　连续介质的概念 ······ 1
1.1.2　流体的基本性质 ······ 2
1.1.3　作用在流体上的力 ······ 3
1.1.4　研究流体运动的方法 ······ 3
1.2　流体运动的基本概念 ······ 4
1.2.1　层流流动与紊流流动 ······ 4
1.2.2　有旋流动与无旋流动 ······ 5
1.2.3　声速与马赫数 ······ 5
1.2.4　膨胀波与激波 ······ 6
1.3　附面层理论 ······ 7
1.3.1　附面层概念及附面层厚度 ······ 7
1.3.2　附面层微分方程 ······ 7
1.4　流体运动及换热的多维方程组 ······ 8
1.4.1　物质导数 ······ 8
1.4.2　不同形式的 N−S 方程 ······ 8
1.4.3　能量方程与导热方程 ······ 11
1.5　湍流模型 ······ 11
1.6　计算网格与边界条件 ······ 14
1.6.1　计算网格 ······ 14
1.6.2　边界条件 ······ 14
第 2 章　流体流动分析软件概述 ······ 16
2.1　CFD 软件简介 ······ 16
2.1.1　CFD 软件结构 ······ 16
2.1.2　CFD 软件的基本模型 ······ 18
2.1.3　常用的 CFD 商用软件 ······ 21
2.2　FLUENT 软件简介 ······ 23
2.2.1　FLUENT 系列软件介绍 ······ 23
2.2.2　FLUENT 软件的结构及特点 ······ 25
2.3　FLUENT 6.3 软件包的安装及运行 ······ 27
2.3.1　FLUENT 6.3 软件包的安装 ······ 28
2.3.2　FLUENT 6.3 软件包的运行 ······ 29
2.4　FLUENT 6.3 的功能模块和分析过程 ······ 29
2.4.1　FLUENT 6.3 的功能模块 ······ 29
2.4.2　FLUENT 6.3 的分析过程 ······ 31
第 3 章　FLUENT 6.3 的使用 ······ 34
3.1　FLUENT 6.3 的操作界面 ······ 34
3.1.1　FLUENT 6.3 的启动界面 ······ 34
3.1.2　FLUENT 6.3 的图形用户界面 ······ 34
3.1.3　FLUENT 6.3 的文本用户界面及 Scheme 表达式 ······ 37
3.1.4　FLUENT 6.3 的图形控制及鼠标使用 ······ 39
3.2　FLUENT 6.3 对网格的基本操作 ······ 40
3.2.1　导入和检查网络 ······ 40
3.2.2　显示和修改网格 ······ 44
3.3　选择 FLUENT 6.3 求解器及运行环境 ······ 49
3.3.1　FLUENT 6.3 求解器的比较与选择 ······ 49
3.3.2　FLUENT 6.3 计算模式的选择 ······ 50
3.3.3　FLUENT 6.3 运行环境的选择 ······ 50
3.3.4　FLUENT 6.3 的基本物理模型 ······ 51
3.3.5　FLUENT 6.3 的材料定义 ······ 57
3.4　设置 FLUENT 6.3 的边界条件 ······ 58
3.5　设置 FLUENT 6.3 的求解参数 ······ 70
第 4 章　网格生成软件 GAMBIT ······ 72
4.1　GAMBIT 简介 ······ 72
4.1.1　GAMBIT 的功能及特点 ······ 72





4.1.2 GAMBIT 的操作界面……73
4.2 GAMBIT 的操作步骤……76
4.2.1 建立几何模型……76
4.2.2 划分网格……79
4.2.3 定义边界……81
4.2.4 GAMBIT 与其他软件的联用……83
4.3 GAMBIT 应用实例……83
4.3.1 三维直通管内的湍流模型与网格划分……83
4.3.2 二维轴对称喷嘴模型与网格划分……86
4.3.3 三维 V 形管道模型与网格划分……88
4.3.4 二维搅拌模型与网格划分……91
4.3.5 三维气体吸收塔模型与网格划分……95
4.3.6 三管相贯模型与网格划分……98
第 5 章 Tecplot 软件使用入门……105
5.1 Tecplot 软件概述……105
5.1.1 Tecplot 软件的启动……105
5.1.2 Tecplot 软件的界面……105
5.2 Tecplot 软件绘图环境设置……110
5.2.1 帧的创建和编辑……110
5.2.2 网格和标尺的设定……111
5.2.3 坐标系统……111
5.3 Tecplot 软件使用技巧……112
5.3.1 XY 曲线图显示……112
5.3.2 二维视图显示……114
5.3.3 三维视图显示……118
5.4 Tecplot 软件的数据格式……120
5.4.1 Tecplot 软件的数据层次……120
5.4.2 多数据区域……122
5.4.3 数据区域中的数据结构……122
5.5 Tecplot 软件对 FLUENT 软件的数据进行后处理……122
5.5.1 Tecplot 软件读取 FLUENT 软件的文件数据……122
5.5.2 Tecplot 软件后处理实例——三维弯管水流速度场模拟……124
第 6 章 UDF 使用简介……132
6.1 UDF 基础……132
6.1.1 UDF 概述……132
6.1.2 FLUENT 软件中的网格拓扑……133
6.1.3 FLUENT 软件中的数据类型……134
6.2 UDF 宏……134
6.2.1 UDF 中访问 FLUENT 软件中的变量的宏……134
6.2.2 UDF 实用工具宏……140
6.2.3 常用 DEFINE 宏……150
6.3 UDF 的解释和编译……154
6.3.1 UDF 的解释……154
6.3.2 UDF 的编译……154
6.3.3 在 FLUENT 软件中激活 UDF……155
6.4 UDF 应用实例——管道流动凝固过程……157
第 7 章 湍流模型模拟……164
7.1 湍流模型概述……164
7.1.1 单方程模型……164
7.1.2 标准 $k-\varepsilon$ 模型……165
7.1.3 重整化群 $k-\varepsilon$ 模型……166
7.1.4 可实现 $k-\varepsilon$ 模型……166
7.1.5 Reynolds 应力模型……167
7.1.6 大涡模拟……168
7.2 湍流模型的设置……169
7.3 湍流模型实例——瀑布流过圆柱形石块时的流场……170
第 8 章 多相流模型模拟……180
8.1 FLUENT 软件中的多相流模型……180
8.1.1 VOF 模型……180
8.1.2 Mixture 模型……181
8.1.3 Eulerian 模型……181
8.2 通用多相流模型的选择与使用……182
8.2.1 通用多相流模型的选择……182
8.2.2 通用多相流模型的设置……182
8.2.3 一般多相流问题的求解策略……184
8.3 多相流计算实例……184



8.3.1 二维喷射流场模拟……184
8.3.2 水油混合物T形管流动模拟……190
第9章 滑移网格模型模拟……196
9.1 滑移网格模型概述……196
9.2 滑移网格的设置……197
9.3 滑移网格实例分析——十字搅拌器流场模拟……198
第10章 动网格模型模拟……204
10.1 动网格模型概述……204
10.2 动网格的设置……205
10.2.1 动网格参数的设置……206
10.2.2 动网格运动方式的定义……207
10.2.3 动网格预览……208
10.3 动网格实例分析……209
10.3.1 二维实体入水模拟……209
10.3.2 三维活塞在气缸中的运动模拟……215
第11章 物质运输和有限速率化学反应模型模拟……224
11.1 有限速率化学反应……224
11.1.1 化学反应模型概述……224
11.1.2 有限速率化学反应的设置……228
11.1.3 PDF输运模型……231
11.2 燃烧模型……232
11.2.1 燃烧模型概述……232
11.2.2 燃烧模型的计算方式……234
11.2.3 燃烧模拟的设置……236
11.3 组分传输和化学反应模型实例……237
11.3.1 气体燃烧温度场模拟……237
11.3.2 废气排放组分浓度模拟……242
第12章 并行计算……248
12.1 开启并行求解器……248
12.2 使用并行网络工作平台……248
12.3 分割网格……249
12.4 检测并提高并行性能……253
第13章 FLUENT 6.3综合应用实例……254
13.1 二维三通管内流体的流动分析……254
13.2 二维自然对流换热问题的分析……266
13.3 喷嘴内气体流动分析……274
13.4 U形管内流体运动分析……280
13.5 套管内气液两相流动模拟……285
13.6 三维室内温度传热模拟……293
13.7 液相凝固温度模拟……300
13.8 二维瞬间闸门倾洪流动模拟……304
13.9 水浴加热保温流场模拟……310
13.10 三维流-固耦合散热模拟……315



第 1 章　流体力学基础

流体力学是力学的一个重要的分支，也是理论性很强的一门科学，涉及很多复杂的理论和公式。本章重点介绍流体力学和流体运动的基本概念以及流体流动和传热的基本控制方程、边界层的基本理论。通过本章的学习，让读者掌握流体流动和传热的基本控制方程，为后面的软件操作打下理论基础。

1.1　流体力学基本概念

本节简要介绍了流体的连续介质模型、基本性质以及研究流体运动的方法。

1.1.1　连续介质的概念

气体与液体都属流体。从微观角度讲，无论是气体还是液体，分子间都存在间隙，同时由于分子的随机运动，导致流体的质量在空间上的分布是不连续的，而且任意空间点上流体物理量相对时间也是不连续的。但是从宏观的角度考虑，流体的结构和运动又表现出明显的连续性与确定性，而流体力学研究的正是流体的宏观运动。在流体力学中，正是用宏观流体模型来代替微观有空隙的分子结构。1753 年欧拉首先采用了“连续介质”作为宏观流体模型，将流体看成是由无限多流体质点所组成的稠密而无间隙的连续介质，这个模型称为连续介质模型。

流体的密度定义为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1-1}$$

式中，ρ 代表流体密度；m 为流体质量；V 为质量 m 的流体所占的体积。

对于非均质流体，流体中任意一点的密度定义为

$$\rho = \lim_{\Delta v \to \Delta v_0} \frac{\Delta m}{\Delta v} \tag{1-2}$$

在式（1−2）中，Δv_0 是设想的一个最小体积，在 Δv_0 内包含足够多的分子，使得密度的统计平均值（$\frac{\Delta m}{\Delta v}$）有确切的意义。这个 Δv_0 就是流体质点的体积，所以连续介质中某一点的流体密度实质上是流体质点的密度。同样，连续介质中某一点的流体速度指在某瞬时质心在该点的流体质点的质心速度。不仅如此，空间任意点上的流体物理量都指位于该点上的流体质点的物理量。



1.1.2 流体的基本性质

1．流体压缩性

流体体积会随作用其上的压强的增加而减小的特性称为流体的压缩性，通常用压缩系数 β 来度量，它具体定义为：在一定温度下，升高单位压强时流体体积的相对缩小量，即

$$\beta = \frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}p} \tag{1-3}$$

纯液体的压缩性很差，通常情况下可以认为液体的体积和密度是不变的。对于气体，其密度随压强的变化是和热力学过程有关的。

2．流体的膨胀性

流体体积随温度的升高而增大的特性称为流体的膨胀性，通常用膨胀系数 α 来度量，它具体定义为：在压强不变的情况下，温度上升 1℃时流体体积的相对增加量，即

$$\alpha = -\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}T} \tag{1-4}$$

一般来说，液体的膨胀系数都很小，通常情况下工程中不考虑它们的膨胀性。

3．流体的粘性

在作相对运动的两流体层的接触面上存在一对等值而且反向的力阻碍两相邻流体层的相对运动，流体的这种性质称为流体的粘性，由粘性产生的作用力称为粘性阻力或内摩擦力。粘性阻力产生的物理原因是由于存在分子不规则运动的动量交换和分子间吸引力。根据牛顿内摩擦定律，两层流体间的切应力表达式为

$$\tau = \mu\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}y} \tag{1-5}$$

式中，τ 为切应力；μ 称为动力粘性系数，与流体种类和温度有关；$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}y}$ 为垂直于两层流体接触面上的速度梯度。

我们把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。粘性系数受温度的影响很大：当温度升高时，液体的粘性系数减小，粘性下降，而气体的粘性系数增大，粘性增加。当压强不是很高的情况下，粘性系数受压强的影响很小，只有当压强很高（如几十个兆帕）时，才需要考虑压强对粘性系数的影响。

4．流体的导热性

当流体内部或流体与其他介质之间存在温度差时，温度高的地方与温度低的地方之间会发生热量交换。热量交换有热传导、热对流、热辐射 3 种形式。当流体在管内高速流动时，在紧贴壁面的位置会形成层流底层，液体在该处相对壁面的流速很低，几乎可看做是零，所以与壁面进行的主要是热传导，而层流以外的区域的热流传递形式主要是热对流。

单位时间内通过单位面积由热传导所传递的热量可按傅里叶导热定律确定：

$$q = -\lambda\frac{\partial T}{\partial n} \tag{1-6}$$

式中，n 是面积的法线方向；$\frac{\partial T}{\partial n}$ 是沿 n 方向的温度梯度；λ 是导热系数；负号表示热量传递方向与温度梯度方向相反。



通常情况下，流体与固体壁面间的对流换热量可用下式表达：

$$q = h(T_1 - T_2) \tag{1-7}$$

式中，h 为对流换热系数，与流体的物理性质、流动状态等因素有关，主要是依靠试验数据得出的经验公式来确定。

▷▷▷ 1.1.3　作用在流体上的力

作用在流体上的力可分为质量力与表面力两类。所谓质量力（或体积力）指作用在体积 V 内每一液体质量（或体积）上的非接触力，其大小与流体质量成正比。重力、惯性力、电磁力都属于质量力。所谓表面力指作用在所取流体体积表面 S 上的力，它是由与这块流体相接触的流体或物体的直接作用而产生的。

在流体表面围绕 M 点选取一微元面积，作用在其上的表面力用 ΔF_S 表示，将 ΔF_S 分解为垂直于微元表面的法向力 ΔF_n 和平行于微元表面的切向力 ΔF_t。在静止流体或运动的理想流体中，表面力只存在垂直于表面上的法向力 ΔF_n，这时作用在 M 点周围单位面积上的法向力就定义为 M 点上的流体静压强，即

$$p = \lim_{\Delta S \to \Delta S_0} \frac{\Delta \boldsymbol{F}_n}{\Delta S} \tag{1-8}$$

式中，ΔS_0 是与流体质点的体积具有相比拟尺度的微小面积。

静压强又常称为静压。流体静压强具有两个重要特性：

（1）流体静压强的方向总是与作用面垂直，并且指向作用面。

（2）在静止流体或理想运动流体中，某一点静压强的大小各向相等，与所取作用面的方位无关。

▷▷▷ 1.1.4　研究流体运动的方法

在研究流体运动时有两种方法，一种是从分析流体各个质点的运动入手，来研究整个流体的运动；另一种是从分析流体所占据的空间中各固定点处的流体运动入手，来研究整个流体的运动。

在任意空间点上，流体质点的全部流动参数，如速度、压强、密度等都不随时间改变，这种流动称为定常流动；若流体质点的全部或部分流动参数随时间的变化而改变，则称为非定常流动。

人们常用迹线或流线的概念来描述流场：任何一个流体质点在流场中的运动轨迹称为迹线，迹线是某一流体质点在一段时间内所经过的路径，是同一流体质点不同时刻所在位置的连线；流线是某一瞬时各流体质点的运动方向线，在该曲线上各点的速度矢量相切于这条曲线。在定常流动中，流动与时间无关，流线不随时间改变，流体质点沿着流线运动，流线与迹线重合。对于非定常流动，迹线与流线是不同的。

下面给出一维定常流动的 3 个基本方程：连续（质量）方程、动量方程、能量方程。

（1）连续（质量）方程　连续方程是把质量守恒定律应用于流体所得的数学表达式。一维定常流动连续方程的微分形式为

$$\frac{d\rho}{\rho}+\frac{dA}{A}+\frac{dV}{V}=0 \tag{1-9}$$

连续方程是质量守恒的数学表达式，与流体的性质、是否有粘性作用、是否有其他外力作用、是否有外加热无关。

（2）动量方程　动量方程是把牛顿第二定律应用于运动流体所得到的数学表达式。此定律可表述为：在某一瞬时，体系的动量对时间的变化率等于该瞬时作用在该体系上的全部外力的合力，而且动量的时间变化率的方向与合力的方向相同。

设环境对瞬时占据控制体内的流体的全部作用力为 $\sum \boldsymbol{F}$，则根据牛顿第二定律得到

$$\sum F = \dot{m}(V_2 - V_1) \tag{1-10}$$

式（1−10）就是牛顿第二运动定律适用于控制体时的形式。它说明在定常流动中，作用在控制体上的全部外力的合力 $\sum \boldsymbol{F}$，应等于控制面 2 流体动量的流出率与控制面 1 流体动量的流入率之差。当我们需要研究流体在流动过程中的详细变化情况时，就需要知道微分形式的动量方程了。

$$\rho g dz + dp + \rho V dV = 0 \tag{1-11}$$

式（1−11）是无粘流体一维定常流动的运动微分方程，它表明沿任意一根流线，流体质点的压强、密度、速度和位移之间的微分关系。

（3）能量方程　能量方程是热力学第一定律应用于流动流体所得到的数学表达式。不可压无粘流体的绝能定常流动的能量方程表达式为

$$g dz + d\left(\frac{p}{\rho}\right) + d\left(\frac{V^2}{2}\right) = 0 \tag{1-12}$$

1.2　流体运动的基本概念

下面简要介绍流体运动的几个基本概念，这些概念都是有关流体运动的最基本的术语，读者有必要了解一下。

1.2.1　层流流动与紊流流动

当流体在圆管中流动时，如果管中流体是一层一层流动的，各层间互不干扰，互不相混，这样的流动状态称为层流流动。当流速逐渐增大时，流体质点除了沿管轴向运动外，还有垂直于管轴向方向的横向流动，即层流流动已被打破，完全处于无规则的乱流状态，这种流动状态称为紊流或湍流。我们把流动状态发生变化（从层流到紊流）时的流速称为临界速度。

大量实验数据与相关理论证实，流动状态不仅取决于临界速度，还与综合反映管道尺寸、流体物理属性、流动速度的组合量——雷诺数有关。雷诺数 Re 定义为

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \tag{1-13}$$

式中，d 为管道直径；V 为平均流速；μ 为动力粘性系数。

由层流开始转变到紊流时所对应的雷诺数称为上临界雷诺数，用 Re'_{cr} 表示；由紊流转变



到层流所对应的雷诺数称为下临界雷诺数，用 Re_{cr} 表示。通过比较实际流动的雷诺数与临界雷诺数，就可确定粘性流体的流动状态：

（1）当 $Re < Re_{cr}$ 时，流动为层流状态。

（2）当 $Re > Re'_{cr}$ 时，流动为紊流状态。

（3）当 $Re_{cr} < Re < Re'_{cr}$ 时，可能为层流，也可能为紊流。

在工程应用中，取 Re_{cr} =2 000。当 $Re < 2\,000$ 时；流动为层流运动；当 $Re > 2\,000$ 时，可认为流动为紊流。

实际上，雷诺数反映了惯性力与粘性力之比，雷诺数越小，表明流体粘性力作用较大，能够削弱引起湍流流动的扰动，保持层流状态；如果雷诺数越大，则表明惯性力对流体的作用更明显，易使流体质点发生紊流流动。

▷▷▷ 1.2.2　有旋流动与无旋流动

有旋流动指流场中流体微团的旋转角速度不等于零的流动。无旋流动指流场中各处的旋转角速度都为零的流动。流体质点的旋转角速度是一个矢量，用 ω 表示，其表达式为

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{1}{2}\begin{vmatrix} \boldsymbol{i} & \boldsymbol{j} & \boldsymbol{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \boldsymbol{u} & \boldsymbol{v} & \boldsymbol{w} \end{vmatrix} \tag{1-14}$$

若 $\boldsymbol{\omega}$=0，则称流动为无旋流动，否则为有旋流动。

流体运动是有旋还是无旋，取决于流体微团是否有旋转运动，与流体微团的运动轨迹无关。在流体流动中，如果考虑粘性，由于存在摩擦力，这时流动为有旋流动。如果粘性可以忽略，而来流本身又是无旋流，如均匀流，这时流动为无旋流动。例如，均匀气流流过平板，在紧靠壁面的附面层内需要考虑粘性影响。因此，附面层内为有旋流动，附面层外的流动，粘性可以忽略，可视为无旋流动。

▷▷▷ 1.2.3　声速与马赫数

声速指微弱扰动波在流体介质中的传播速度，它是流体可压缩性的标志，对于确定可压缩流的特性和规律起着重要作用。声速表达式的微分形式为

$$c = \sqrt{\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\rho}} \tag{1-15}$$

当声速在气体中传播时，由于在微弱扰动的传播过程中，气流的压强、密度和温度的变化都是无限小量，若忽略粘性作用，整个过程接近可逆过程，同时该过程进行得很迅速，又接近一个绝热过程，所以微弱扰动的传播可以认为是一个等熵的过程。对于完全气体，声速又可表示为

$$c = \sqrt{kRT} \tag{1-16}$$

式中，k 为比热比；R 为气体常数。

式（1-16）只能用来计算微弱扰动的传播速度；对于强扰动，如激波、爆炸波等，其传播速度比声速大，并随波的强度增大而加快。

流场中某点处气体流速 V 与当地声速 c 之比称为该点处气流的马赫数，用 Ma 表示，即

$$Ma = \frac{V}{c} \tag{1-17}$$

马赫数表示气体宏观运动的动能与气体内部分子无规则运动的动能（即内能）之比的度量。当 $Ma \leqslant 0.3$ 时，密度的变化可以忽略；当 $Ma > 0.3$ 时，就必须考虑气流压缩性的影响。因此，马赫数是研究高速流动的重要参数，是划分高速流动类型的标准：当 $1 < Ma < 3$ 时，为超声速流动；当 $Ma < 1$ 时，为亚声速流动；当 $Ma \approx 1$ 时，为跨声速流动；当 $Ma > 3$ 时，为超高声速流动。超声速流动与亚声速流动的规律有本质的区别。跨声速流动兼有超声速流动与亚声速流动的某些特点，是更复杂的流动。

▷▷▷ 1.2.4　膨胀波与激波

膨胀波与激波是超声速气流特有的重要现象，超声速气流在加速时要产生膨胀波，减速时一般会出现激波。

当超声速气流流经由微小外折角所引起的马赫波时，气流加速，压强和密度下降，这种马赫波就是膨胀波。超声速气流沿外凸壁流动的基本微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}V}{V} = -\frac{\mathrm{d}\theta}{\sqrt{Ma^2 - 1}} \tag{1-18}$$

当超声速气流绕物体流动时，在流场中往往出现强压缩波，即激波。气流经过激波后，压强、温度和密度均突然升高，速度则突然下降。超声速气流被压缩时一般都会产生激波，所以激波是超声速气流中的重要现象之一。按照激波的形状，可将激波分为以下几类：

（1）正激波　气流方向与波面垂直。

（2）斜激波　气流方向与波面不垂直。例如，当超声速气流流过楔形物体时，在物体前缘往往产生斜激波。

（3）曲线激波　波形为曲线形。

设激波前的气流速度、压强、温度、密度和马赫数分别为 v_1、p_1、T_1、ρ_1、Ma_1，经过激波后突跃地增加到 v_2、p_2、T_2、ρ_2 和 Ma_2，则激波前后气流应满足以下方程。

连续性方程

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \tag{1-19}$$

动量方程

$$p_2 - p_1 = \rho_1 {v_1}^2 - \rho_2 {v_2}^2 \tag{1-20}$$

能量方程（绝热）

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{k}{k-1}\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{k}{k-1}\frac{p_2}{\rho_2} \tag{1-21}$$

状态方程

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \tag{1-22}$$

据此，可得出激波前后参数的关系：



$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{2k}{k+1}Ma_1^2-\frac{k-1}{k+1} \tag{1-23}$$

$$\frac{v_2}{v_1}=\frac{k-1}{k+1}+\frac{2}{(k+1)Ma_1^2} \tag{1-24}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1}=\frac{\frac{k+1}{k-1}Ma_1^2}{\frac{2}{k-1}+Ma_1^2} \tag{1-25}$$

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{2kMa_1^2-k+1}{k+1}\right)\left(\frac{2+\left(k-1\right)Ma_1^2}{\left(k+1\right)Ma_1^2}\right) \tag{1-26}$$

$$\frac{Ma_2^2}{Ma_1^2}=\frac{Ma_1^{-2}+\frac{k-1}{2}}{kMa_1^2-\frac{k-1}{2}} \tag{1-27}$$

1.3　附面层理论

附面层是流体力学中经常要涉及的一个概念，下面简要进行介绍。

1.3.1　附面层概念及附面层厚度

当粘性较小的流体绕流物体时，粘性的影响仅限于贴近物面的薄层中，在这薄层之外，粘性的影响可以忽略。普朗特把物面上受到粘性影响的这一薄层称为附面层（或边界层）。他根据在大雷诺数下附面层非常薄的前提，对粘性流体运动方程做了简化，得到了被人们称为普朗特方程的附面层微分方程。

附面层厚度 δ 的定义：如果以 V_0 表示外部无粘流速度，则通常把各个截面上速度达到 $V_x=0.99V_0$ 或 $V_x=0.995V_0$ 值的所有点的连线定义为附面层外边界，而从外边界到物面的垂直距离定义为附面层厚度。

1.3.2　附面层微分方程

根据附面层概念对粘性流动的基本方程的每一项进行数量级的估计，忽略数量级较小的量，这样在保证一定精度的情况下使方程得到简化，得出适用于附面层的基本方程。

（1）层流附面层方程

$$\begin{aligned}&\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_y}{\partial y}=0\\&V_x\frac{\partial V_x}{\partial y}+V_y\frac{\partial V_y}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\\&\frac{\partial p}{\partial y}=0\end{aligned} \tag{1-28}$$

这是平壁面二维附面层方程，适用于平板及楔形物体。式（1−28）求解的边界条件

如下：

1）在物面上 $y=0$ 处，满足无滑移条件，$V_x=0$，$V_y=0$。

2）在附面层外边界 $y=\delta$ 处，$V_x=V_0(x)$。$V_0(x)$ 是附面层外部边界上无粘流的速度，它由无粘流场求解获得，在计算附面层流动时，作为已知的参数。

（2）紊流附面层方程

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\bar{V}_x}{\partial x}+\frac{\partial\bar{V}_y}{\partial y}=0\\&\bar{V}_x\frac{\partial\bar{V}_x}{\partial x}+V_y\frac{\partial\bar{V}_x}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}Pe}{\mathrm{d}x}+\upsilon\frac{\partial^2\bar{V}_x}{\partial y^2}-\frac{\partial}{\partial y}\left(\overline{V_x'V_y'}\right)\end{aligned}\tag{1-29}$$

对于附面层方程，在雷诺数很高时才有足够的精度，在雷诺数不比 1 大许多的情况下，附面层方程是不适用的。

1.4 流体运动及换热的多维方程组

本节将给出求解多维流体运动与换热的方程组。

1.4.1 物质导数

把流场中的物理量看做是空间和时间的函数：

$$T=T(x,y,z,t)\qquad p=p(x,y,z,t)\qquad v=v(x,y,z,t)$$

研究各物理量对时间的变化率，如速度分量 u 对时间的变化率，则有

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}+\frac{\partial u}{\partial z}\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\tag{1-30}$$

式中的 u，v，w 分别为速度沿 x，y，z 3 个方向的速度矢量。

将式（1−30）中的 u 用 N 替换，代表任意物理量，得到任意物理量 N 对时间 t 的变化率为

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial N}{\partial t}+u\frac{\partial N}{\partial x}+v\frac{\partial N}{\partial y}+w\frac{\partial N}{\partial z}\tag{1-31}$$

这就是任意物理量 N 的物质导数，也称为质点导数。

1.4.2 不同形式的 N−S 方程

下面给出不同形式的 N−S 方程组。

由流体的粘性本构方程得到直角坐标系下的 N−S（Navier−Stokes）方程：

$$\begin{aligned}&\rho\frac{Du}{Dt}=\rho F_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\frac{\mu}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right)\right]\\&\rho\frac{Dv}{Dt}=\rho F_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\frac{\mu}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right)\right]\\&\rho\frac{Dw}{Dt}=\rho F_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\frac{\mu}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right)\right]\end{aligned}\tag{1-32}$$



如果忽略粘性的变化，认为粘性系数为常数时，式（1−32）简化为矢量形式的 N−S 方程：

$$\rho\frac{Dv}{Dt}=\rho\boldsymbol{F}-\nabla p+\mu\nabla^2 v+\frac{1}{3}\mu\nabla\left(\nabla\cdot v\right) \tag{1-33}$$

对于不可压流，$\nabla\cdot v=0$，则由式（1−33）得到不可压流常粘性系数的 N−S 方程：

$$\rho\frac{Dv}{Dt}=\rho\boldsymbol{F}-\nabla p+\mu\nabla^2 v \tag{1-34}$$

在处理实际问题时，为提高边界附近数值计算的精度，常常使用贴体的任意曲线坐标系对方程求解。根据直角坐标系中建立的流体力学诸方程，可利用雅可比（Jacobian）理论导出任意曲线坐标系下的流体力学诸方程。忽略质量力后，在直角坐标系中流体力学诸方程的统一形式可写为

$$\frac{\partial\boldsymbol{F}}{\partial x}+\frac{\partial\boldsymbol{G}}{\partial y}+\frac{\partial\boldsymbol{H}}{\partial z}=\frac{\partial\boldsymbol{R}}{\partial x}+\frac{\partial\boldsymbol{S}}{\partial y}+\frac{\partial\boldsymbol{T}}{\partial z}+\boldsymbol{K} \tag{1-35}$$

式中，R，S，T 为粘性项；K 为压力项。

各项的表达式为

$$\boldsymbol{F}=\begin{pmatrix}\rho u\\ \rho u^2\\ \rho uv\\ \rho uw\end{pmatrix},\qquad \boldsymbol{G}=\begin{pmatrix}\rho v\\ \rho uv\\ \rho v^2\\ \rho vw\end{pmatrix},\qquad \boldsymbol{H}=\begin{pmatrix}\rho w\\ \rho uw\\ \rho vw\\ \rho w^2\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}0\\ \tau_{xx}\\ \tau_{xy}\\ \tau_{xz}\end{pmatrix},\qquad \boldsymbol{S}=\begin{pmatrix}0\\ \tau_{yx}\\ \tau_{yy}\\ \tau_{yz}\end{pmatrix},\qquad \boldsymbol{T}=\begin{pmatrix}0\\ \tau_{zx}\\ \tau_{zy}\\ \tau_{zz}\end{pmatrix},\qquad \boldsymbol{K}=\begin{pmatrix}0\\ -\dfrac{\partial p}{\partial x}\\ -\dfrac{\partial p}{\partial y}\\ -\dfrac{\partial p}{\partial z}\end{pmatrix}$$

利用守恒方程坐标不变性方程式，将式（1−35）变换为(ξ,η,ζ)坐标系下相应的N−S 方程：

$$\frac{\partial\hat{\boldsymbol{F}}}{\partial\xi}+\frac{\partial\hat{\boldsymbol{G}}}{\partial\eta}+\frac{\partial\hat{\boldsymbol{H}}}{\partial\zeta}=\frac{\partial\hat{\boldsymbol{R}}}{\partial\xi}+\frac{\partial\hat{\boldsymbol{S}}}{\partial\eta}+\frac{\partial\hat{\boldsymbol{T}}}{\partial\zeta}+\boldsymbol{K} \tag{1-36}$$

式中

$$\hat{\boldsymbol{F}}=\frac{1}{\boldsymbol{J}}\begin{pmatrix}\rho U\\ \rho UU\\ \rho UV\\ \rho UW\end{pmatrix},\qquad \hat{\boldsymbol{G}}=\frac{1}{\boldsymbol{J}}\begin{pmatrix}\rho V\\ \rho UV\\ \rho VV\\ \rho VW\end{pmatrix},\qquad \hat{\boldsymbol{H}}=\frac{1}{\boldsymbol{J}}\begin{pmatrix}\rho W\\ \rho UW\\ \rho VW\\ \rho WW\end{pmatrix}$$

$$\hat{\boldsymbol{R}}=\frac{1}{\boldsymbol{J}}\begin{pmatrix}0\\ \xi_x\tau_x^{\xi}+\xi_y\tau_y^{\xi}+\xi_z\tau_z^{\xi}\\ \eta_x\tau_x^{\xi}+\eta_y\tau_y^{\xi}+\eta_z\tau_z^{\xi}\\ \zeta_x\tau_x^{\xi}+\zeta_y\tau_y^{\xi}+\zeta_z\tau_z^{\xi}\end{pmatrix},\qquad \hat{\boldsymbol{S}}=\frac{1}{\boldsymbol{J}}\begin{pmatrix}0\\ \xi_x\tau_x^{\eta}+\xi_y\tau_y^{\eta}+\xi_z\tau_z^{\eta}\\ \eta_x\tau_x^{\eta}+\eta_y\tau_y^{\eta}+\eta_z\tau_z^{\eta}\\ \zeta_x\tau_x^{\eta}+\zeta_y\tau_y^{\eta}+\zeta_z\tau_z^{\eta}\end{pmatrix}$$



$$\hat{\boldsymbol{T}}=\frac{1}{\boldsymbol{J}}\begin{pmatrix}0\\ \xi_x\tau_x^{\zeta}+\xi_y\tau_y^{\zeta}+\xi_z\tau_z^{\zeta}\\ \eta_x\tau_x^{\zeta}+\eta_y\tau_y^{\zeta}+\eta_z\tau_z^{\zeta}\\ \zeta_x\tau_x^{\zeta}+\zeta_y\tau_y^{\zeta}+\zeta_z\tau_z^{\zeta}\end{pmatrix},\qquad \hat{\boldsymbol{K}}=\frac{1}{\boldsymbol{J}}\begin{pmatrix}0\\ \rho G_{\xi\xi}-g^{\xi\xi}p_{\xi}-g^{\xi\eta}p_{\eta}-g^{\xi\zeta}p_{\zeta}\\ \rho G_{\eta\eta}-g^{\eta\xi}p_{\xi}-g^{\eta\eta}p_{\eta}-g^{\eta\zeta}p_{\zeta}\\ \rho G_{\zeta\zeta}-g^{\zeta\xi}p_{\xi}-g^{\zeta\eta}p_{\eta}-g^{\zeta\zeta}p_{\zeta}\end{pmatrix}$$

其中，$\boldsymbol{J}$ 为雅可比行列式，其表达式为

$$\boldsymbol{J}=\frac{\partial(\xi,\eta,\zeta)}{\partial(x,y,z)}=\begin{vmatrix}\frac{\partial x}{\partial\xi}&\frac{\partial x}{\partial\eta}&\frac{\partial x}{\partial\zeta}\\ \frac{\partial y}{\partial\xi}&\frac{\partial y}{\partial\eta}&\frac{\partial y}{\partial\zeta}\\ \frac{\partial z}{\partial\xi}&\frac{\partial z}{\partial\eta}&\frac{\partial z}{\partial\zeta}\end{vmatrix}^{-1}$$

在可压方程中，密度是参变量而不是常数，方程组中增添一个能量方程。略去质量力、化学反应和辐射效应，在直角坐标系中的雷诺平均 N−S 方程组为

$$\frac{\partial\boldsymbol{U}}{\partial t}+\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial x}+\frac{\partial\boldsymbol{F}}{\partial y}+\frac{\partial\boldsymbol{G}}{\partial z}=\frac{\partial\boldsymbol{E}_v}{\partial x}+\frac{\partial\boldsymbol{F}_v}{\partial y}+\frac{\partial\boldsymbol{G}_v}{\partial z}\tag{1−37}$$

式中，

$$\boldsymbol{U}=\begin{pmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho w\\ e\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{E}=\begin{pmatrix}\rho u\\ \rho u^2+p\\ \rho uv\\ \rho uw\\ (\rho e+p)u\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}=\begin{pmatrix}\rho v\\ \rho vu\\ \rho v^2+p\\ \rho vw\\ (\rho e+p)v\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{G}=\begin{pmatrix}\rho w\\ \rho wu\\ \rho w\upsilon\\ \rho w^2+p\\ (\rho e+p)w\end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_v=\begin{pmatrix}0\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yy}\\ \tau_{zy}\\ \tau_{yx}u+\tau_{yy}v+\tau_{yz}w-q_y\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{F}_v=\begin{pmatrix}0\\ \tau_{xx}\\ \tau_{yx}\\ \tau_{zx}\\ \tau_{xx}u+\tau_{xy}v+\tau_{xz}w-q_x\end{pmatrix},\quad \boldsymbol{G}_v=\begin{pmatrix}0\\ \tau_{xz}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{zz}\\ \tau_{zx}u+\tau_{zy}v+\tau_{zz}w-q_z\end{pmatrix}$$

其中，

$$e=\frac{1}{\gamma-1}p+\frac{\rho}{2}\left(u^2+v^2+w^2\right)$$

$$q_x=-\left(1+\frac{\mu_T}{\mu}\frac{Pr}{Pr_t}\right)k\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y=-\left(1+\frac{\mu_T}{\mu}\frac{Pr}{Pr_t}\right)k\frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z=-\left(1+\frac{\mu_T}{\mu}\frac{Pr}{Pr_t}\right)k\frac{\partial T}{\partial z}$$



$$\frac{\mu}{\mu_0}=\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{T_0+T_s}{T+T_s}\right)$$

$$k=C_p\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_T}{Pr_t}\right)$$

在以上各式中，Pr为普朗特（Prandtl）数，可取 0.72；Pr_t为湍流普朗特数，取 0.9；μ为分子粘性，由Sutherland公式确定；μ_T为湍流粘性；k为导热系数。

1.4.3　能量方程与导热方程

描述固体内部温度分布的控制方程为导热方程，直角坐标系下三维非稳态导热微分方程的一般形式为

$$\rho c\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial z}\right)+\Phi \tag{1-38}$$

式中，t、ρ、c、Φ及τ分别为微元体的温度、密度、比热容、单位时间单位体积的内热源生成热及时间；λ为导热系数。如果将导热系数看做常数，在无内热源且稳态的情况下，式（1-38）简化为拉普拉斯（Laplace）方程：

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}=0 \tag{1-39}$$

用来求解对流换热的能量方程为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}+u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}+w\frac{\partial t}{\partial z}=\alpha\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right) \tag{1-40}$$

在式（1-40）中，$\alpha=\dfrac{\lambda}{\rho c_p}$称为热扩散率。$u$、$v$、$w$为流体速度的分量，对于固体介质则$u=v=w=0$，这时能量方程式（1-40）即为求解固体内部温度场的导热方程。

1.5　湍流模型

目前处理湍流数值计算问题有 3 种方法：直接数值模拟（DNS）方法，大涡模拟（LES）方法和雷诺平均 N-S 方程（RANS）方法。RANS 方法是目前唯一能够应用于工程计算的方法。雷诺平均 N-S 方程方法首先将满足动力学方程的湍流瞬时运动分解为平均运动和脉动运动两部分，然后把脉动运动部分对平均运动的贡献通过雷诺应力项来模化，也就是通过湍流模式来封闭雷诺平均 N-S 方程使之可以求解。从对模式处理的出发点不同，可将湍流模式理论分为两大类：一类称为雷诺应力模式，另一类称为涡粘性模式。在工程湍流问题中得到广泛应用的模式是涡粘性模式。这是由法国力学家 Boussinesq 仿照分子粘性的思路提出的，即假设雷诺应力为

$$\overline{u_i u_j}=-\nu_t\left(U_{i,\ j}+U_{j,\ i}+\frac{2}{3}U_{k,\ k}\delta_{ij}\right)+\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{1-41}$$

式中，$k=\frac{1}{2}\overline{u_i u_j}$是湍动能；$\nu_t$称为涡粘性系数。



这便是基准涡粘性模式，即假设雷诺应力与平均速度应变率呈线性关系，当平均速度应变率确定后，6 个雷诺应力只须通过确定一个涡粘性系数ν_t就可完全确定，且涡粘性系数各向同性，可以通过附加的湍流量来模化，如湍动能k，耗散率ε，比耗散率ω以及其他湍流量$\tau = k/\varepsilon$，$l = k^{3/2}/\varepsilon$，$q=\sqrt{k}$。根据引入湍流量的不同，可以得到不同的涡粘性模式，如$k-\varepsilon$和$k-\omega$模式等。对应不同模式，涡粘性系数可表示为

$$\nu_t = C_\mu k^2/\varepsilon \text{（}k-\varepsilon\text{ 模式），} \nu_t = C_\mu \frac{k}{\omega} \text{（}k-\omega\text{ 模式）}$$

为使控制方程封闭，引入多少个附加的湍流量，就要同时求解多少个附加的微分方程。根据要求解的附加微分方程的数目，一般可将涡粘性模式分为 3 类：零方程和半方程模式、一方程模式、两方程模式。

所有一方程和两方程的湍流模型都可写为如下的一般形式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(X) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(X) = S_P + S_D + D \tag{1-42}$$

式中，S_P是“产生”源项；S_D是“破坏”源项；D表示扩散项，其形式为$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\ )\frac{\partial X}{\partial x_j}\right]$。

1．SST $k-\omega$ 双方程模型

该模型在近壁处采用 Wilcox $k-\omega$模型，在边界层边缘和自由剪切层采用$k-\varepsilon$模型（$k-\omega$形式），其间通过一个混合函数来过渡。$k-\omega$湍流模型主要求解湍动能k及其比耗散率ω的对流输运方程，对于 SST $k-\omega$双方程模型，其湍动能输运方程为

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j k - (\mu + \sigma_k \mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] = \tau_{tij} S_{ij} - \beta^* \rho \omega k \tag{1-43}$$

湍流比耗散率方程为

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j \omega - (\mu + \sigma_\omega \mu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] = P_\omega - \beta \rho \omega^2 + 2(1-F_1)\frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k \partial \omega}{\partial x_j \partial x_j} \tag{1-44}$$

在式（1−43）和式（1−44）中，雷诺应力的涡粘性模型为

$$\tau_{tij} = 2\mu_t \left(S_{ij} - S_{nn}\delta_{ij}/3\right) - 2\rho k \delta_{ij}/3 \tag{1-45}$$

在式（1−45）中，$\mu_t = \rho k/\omega$为涡粘性；S_{ij}为平均速度应变率张量；δ_{ij}为克罗内克算子。P_ω为生成项：

$$P_\omega = 2\gamma\rho\left(S_{ij} - \omega S_{nn}\delta_{ij}/3\right)S_{ij} \tag{1-46}$$

其中，F_1、β、γ、σ_k、σ_ω均为模型参数；β^*为模型常数，取 0.09。

2．RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型

RNG $k-\varepsilon$湍流模型是从暂态 N−S 方程中推出的，其中k方程和ε方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{1-47}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k + C_{3\varepsilon}G_b\right) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{1-48}$$



与标准 $k-\varepsilon$ 模型相比，RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型考虑了湍流旋涡的影响，并为湍流普朗特数提供了一个解析公式。因而，RNG 模型相比于标准 $k-\varepsilon$ 模型对瞬变流和流线弯曲的影响能作出更好的反应。

3．SA 湍流模型

用 SA 模型求解一个有关涡粘性的变量 $\hat{\nu}$ 的方程为

$$\mu_t = \rho\hat{\nu} f_{v_1}$$

$$f_{v_1} = \frac{x^3}{x^3 + C_{v_1}^3}$$

$$x \equiv \frac{\hat{\nu}}{\nu}$$

SA 模型方程为

$$\begin{aligned}\frac{\partial\hat{\nu}}{\partial t} + u_j\frac{\partial\hat{\nu}}{\partial x_j} = {} & C_{b_1}\left(1-f_{t_2}\right)\Omega\hat{\nu} + \\ & \frac{M_\infty}{Re}\left\{C_{b_1}\left[\left(1-f_{t_2}\right)f_{v_2} + f_{t_2}\right]\frac{1}{k^2} - C_{w_1}f_w\right\}\left(\frac{\hat{\nu}}{d}\right)^2 - \\ & \frac{M_\infty}{Re}\frac{C_{b_2}}{\sigma}\hat{\nu}\frac{\partial^2\hat{\nu}}{\partial x_j^2} + \frac{M_\infty}{Re}\frac{1}{\sigma}\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left[\nu + \left(1+C_{b_2}\right)\hat{\nu}\right]\frac{\partial\hat{\nu}}{\partial x_j}\right\}\end{aligned} \tag{1-49}$$

式中，d 为到物面的最近距离。

$$f_{t_2} = C_{t_3}\exp\left(-C_{t_4}x^2\right)$$

$$f_w = g\left(\frac{1+C_{w_3}^6}{g^6 + C_{w_3}^6}\right)^{\frac{1}{6}} = \left(\frac{g^{-6} + C_{w_3}^{-6}}{1+C_{w_3}^{-6}}\right)^{-\frac{1}{6}}$$

$$g = r + C_{w_2}\left(r^6 - r\right)$$

式中，

$$r = \frac{\hat{\nu}}{\hat{S}\left(\dfrac{Re}{M_\infty}\right)k^2d^2}$$

$$S = \Omega + \frac{\hat{\nu}f_{v_2}}{\left(\dfrac{Re}{M_\infty}\right)k^2d^2}$$

$$f_{v_2} = 1 - \frac{x}{1+xf_{v_1}}$$

上几式中的各个常数为

C_{b_1} =0.1355,　　$\sigma = \dfrac{2}{3}$,　　C_{b_2} =0.622,　　k =0.41

C_{w_3} =2.0,　　C_{v_1} =7.1,　　C_{t_3} =1.2,　　C_{t_4} =0.5

$$C_{w_2}=0.3,\qquad C_{w_1}=\frac{C_{b_1}}{k^2}+\frac{\left(1+C_{b_2}\right)}{\sigma}$$

如果用湍流模型的一般形式表示，令 $X=\hat{\nu}$，则

$$S_P=C_{b_1}\left(1-f_{t_2}\right)\Omega\hat{\nu}$$

$$S_D=\frac{M_\infty}{Re}\left\{C_{b_1}\left[\left(1-f_{t_2}\right)f_{v_2}+f_{t_2}\right]\frac{1}{k^2}-C_{w_1}f_w\right\}\left(\frac{\hat{\nu}}{d}\right)^2$$

$$D=-\frac{M_\infty}{Re}\frac{C_{b_2}}{\sigma}\hat{\nu}\frac{\partial^2\hat{\nu}}{\partial x_j^2}+\frac{M_\infty}{Re}\frac{1}{\sigma}\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left[\nu+\left(1+C_{b_2}\right)\hat{\nu}\right]\frac{\partial\hat{\nu}}{\partial x_j}\right\}$$

$k-\varepsilon$ 模型、$k-\omega$ 模型和 SA 模型都有各自的性能特点：SA 模型对附着边界层的模拟效果同零方程模型相似，除射流外，SA 对自由剪切湍流的计算精度较好；$k-\varepsilon$ 模型是目前为止公认的应用最广泛的湍流模型；$k-\omega$ 模型对自由剪切湍流、附着边界层湍流和适度分离湍流都有较高的计算精度。

1.6 计算网格与边界条件

下面简要介绍计算网格和边界条件。这是流场分析涉及的一些基本概念。

1.6.1 计算网格

计算网格的合理设计和高质量的生成是计算流体力学（CFD）计算的前提条件。计算网格按网格点之间的邻近关系可分为结构网格、非结构网格和混合网格。结构网格的网格点之间的邻近关系是有序而规则的，除了边界点外，内部网格点都有相同的邻近网格数，其单元是二维的四边形和三维的六面体。非结构网格点之间的邻接是无序的、不规则的，每个网格点可以有不同的邻接网格数，单元有二维的三角形、四边形，三维的四面体、六面体、三棱柱体和金字塔等多种形状。混合网格是对结构网格与非结构网格的混合。结构网格可以方便地索引，可以减少相应的存储开销，而且由于网格的贴体性，流场的计算精度可以大大提高。非结构网格能够方便地生成复杂外形的网格，能够通过流场中的大梯度区域自适应来提高对间断（如激波）的分辨率，并且使得基于非结构网格的网格分区以及并行计算比结构网格更加直接。但是在同等网格数量的情况下，非结构网格比结构网格所需的内存更大、所需的计算周期更长，而且同样的区域可能需要更多的网格数。此外，在采用完全非结构网格时，因为网格分布各向同性，会给计算结果的精度带来一定的损失，同时对于粘流计算而言，还会导致边界层附近的流动分辨率不高。

1.6.2 边界条件

1．入口边界条件

（1）压力入口　在计算喷管热燃气流场时，可以给出压力入口条件，其中需要输入的主要参数有总压、静压、总温等。

（2）质量入口　在模拟冷却通道内的流动时，通常在冷却剂流量已知的情况下，可以给



出质量流量入口条件。由于入口边界上的质量流量给定，入口压力在计算的收敛过程中是变化的。如果将冷却剂在冷却通道内的流动认为不可压或弱可压，则可用速度入口代替质量流量入口。

2．出口边界条件

（1）压力出口　在燃气流场和冷却通道的计算中，都可使用出口压力边界条件。该条件需给定出口边界上的静压强，如果当地速度超过音速，则需根据来流外推出口边界条件。

（2）无穷远压力边界　在计算某些外流场时，可给出无穷远压力边界条件，该边界条件适用于理想气体定律计算密度的问题。在边界上需给出静压、温度和马赫数。

3．对称边界条件

对具有一定几何特征的物理模型，可取其部分进行计算。例如，轴对称喷管可取半根冷却通道进行计算，截取后的中间平面给出对称边界条件。



第 2 章　流体流动分析软件概述

FLUENT 软件功能非常强大，界面相对复杂。为了帮助读者入门，本章将介绍 FLUENT 软件的应用背景与其安装和运行以及 FLUENT 求解器的功能。通过本章的学习，读者应重点掌握 FLUENT 的基本操作。

2.1　CFD 软件简介

计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）是 20 世纪 60 年代伴随计算机技术迅速崛起的一门新型独立学科。它建立在流体动力学以及数值计算方法的基础上，以研究物理问题为目的，通过计算机数值计算和图像显示方法，在时间和空间上定量地描述流场数值解。

经过半个世纪的迅猛发展，各种 CFD 通用性软件包陆续出现，成为解决各种流体流动与传热问题的强有力的工具，并作为一种商品化软件为工业界广泛接受。随着其性能日趋完善以及应用范围的不断扩大，如今 CFD 技术早已超越了传统的流体机械与流体工程等应用范畴，成功应用于航空、航运、海洋、环境、水利、食品、化工、核能、冶金、建筑等诸多领域。

CFD 通用软件包的出现与商业化，对 CFD 技术在工程应用中的推广起了巨大的促进作用。但由于 CFD 依赖于系统的流体动力学知识和较深入的数理基础，其艰深的理论背景与流体力学问题的复杂多变阻碍了它向工业界推广。如何将 CFD 研究成果与实际应用相结合成为极大难题。在此情况下，通用软件包应运而生。英国 CHAM 公司的 Spalding 与 Patankar 在 20 世纪 70 年代提出了 SIMPLE 算法（半隐式压力校正解法），在 20 世纪 80 年代初以该方法为基础推出了计算流体力学与传热学的商业化软件 PHOENICS 的早期版本。在其版本不断更新的同时，新的通用软件，如 FLUENT、STAR-CD 与 CFX 等也相继问世。这些软件十分重视商业化的要求，致力于工程实际应用，并在前、后处理人机对话等方面成绩卓越，从而被工业界所认识和接受。进入 20 世纪 90 年代，更多的商业化 CFD 应用软件如雨后春笋般出现，涉及范围越来越广。CFD 软件以其模拟复杂流动现象的强大功能、人机对话式的界面操作以及直观清晰的流场显示引起了人们的广泛关注。

2.1.1　CFD 软件结构

各种 CFD 软件的数学模型的组成都是以 N-S 方程组与各种湍流模型为主体，再加上多相流模型、燃烧与化学反应流模型、自由面流模型以及非牛顿流体模型等。大多数附加的模



型是在主体方程组上补充一些附加源项、附加输运方程与关系式。随着应用范围的不断扩大和新方法的出现，新的模型也在增加离散方法，采用有限体积法（FVM）或有限元素法（FEM）。由于有限体积法继承了有限差分法的丰富格式，具有良好的守恒性，所以能像有限元素法那样采用各种形状的网格以适应复杂的边界几何形状，却比有限元素法简便得多。因此，现在大多数 CFD 软件都采用有限体积法。

CFD 软件应能适应从低速到高超音速的宽广速度范围。然而跨、超音速流动计算涉及激波的精确捕获，对离散格式精度要求甚高，难度较大。由于跨、超音速流动主要存在于各种飞行器、高速旋转叶轮机械以及高速喷管、阀门等，在其他工程应用中很少出现，所以有些主要面向低速流动的 CFD 软件在高速流动方面功能比较弱。

CFD 软件的流动显示模块都具有三维显示功能，可以展现各种流动特性，有的还能以动画功能演示非定常过程。

为方便用户使用 CFD 软件处理不同类型的工程问题，一般的 CFD 商用软件往往将复杂的 CFD 过程集成，通过一定的接口，让用户快速地输入问题的有关参数。所有的商用 CFD 软件均包括 3 个基本环节：前处理、求解和后处理。与之对应的程序模块常简称为前处理器、求解器、后处理器。以下简要介绍这 3 个程序模块。

1．前处理器

前处理器（preprocessor）用于完成前处理工作。前处理环节是向 CFD 软件输入所求问题的相关数据，该过程一般是借助与求解器相对应的对话框等图形界面来完成的。在前处理阶段需要用户进行以下工作：

- 定义所求问题的几何计算域。
- 将计算域划分成多个互不重叠的子区域，形成由单元组成的网格。
- 对所要研究的物理和化学现象进行抽象，选择相应的控制方程。
- 定义流体的属性参数。
- 为计算域边界处的单元指定边界条件。
- 对于瞬态问题，指定初始条件。

流动问题的解是在单元内部的节点上定义的，解的精度由网格中单元的数量所决定。一般来讲，单元越多、尺寸越小，所得到解的精度越高，但所需要的计算机内存资源及 CPU 时间也相应增加。为了提高计算精度，在物理量梯度较大的区域和我们感兴趣的区域，往往要加密计算网格。在前处理阶段生成计算网格时，关键要把握好计算精度与计算成本之间的平衡。

目前，在使用商用 CFD 软件进行 CFD 计算时，超过 50%的时间耗费在几何区域的定义及计算网格的生成上。我们可以使用 CFD 软件自身的前处理器来生成几何模型，也可以借用其他商用 CFD 或CAD/CAE 软件（如 PATRAN、ANSYS、I-DEAS、Pro/ENGINEER）提供的几何模型。此外，指定流体参数的任务也是在前处理阶段进行的。

2．求解器

求解器（solver）的核心是数值求解方案。常用的数值求解方案包括有限差分、有限元、谱元法和有限体积法等。总体上讲，这些方法的求解过程大致相同，包括以下步骤：

（1）借助简单函数来近似待求的流动变量。

（2）将该近似关系代入连续型的控制方程中，形成离散方程组。

1 P1
第 2 章 流体流动分析软件概述
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

（3）求解代数方程组。

各种数值求解方案的主要差别在于流动变量被近似的方式及相应的离散化过程。

3．后处理器

后处理的目的是有效地观察和分析流动计算结果。随着计算机图形功能的提高，目前的CFD 软件均配备了后处理器（postprocessor），提供了较为完善的后处理功能，包括：

- 计算域的几何模型及网格显示。
- 矢量图（如速度矢量线）。
- 等值线图。
- 填充型的等值线图（云图）。
- XY 散点图。
- 粒子轨迹图。
- 图像处理功能（平移、缩放、旋转等）。

借助后处理功能，还可以动态模拟流动效果，直观地了解 CFD 软件的计算结果。

2.1.2　CFD 软件的基本模型

流体流动所遵循的物理定律是建立流体运动基本方程组的依据。这些定律主要包括质量守恒、动量守恒、动量矩守恒、能量守恒、热力学第二定律，加上状态方程和本构方程。在实际计算时，还要考虑不同的流态，如层流与湍流。湍流模型是 CFD 软件的主要组成部分之一。通用 CFD 软件都配有各种层次的湍流模型，通常可分为 3 类：第一类是湍流输运系数模型，即将速度脉动的二阶关联量表示成平均速度梯度与湍流粘性系数的乘积，用笛卡儿张量表示为

$$-\rho\overline{u_i'u_j'}=\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{2-1}$$

模型的任务就是给出计算湍流粘性系数μ_{i}的方法。根据建立模型所需要的微分方程的数目，可以分为零方程模型（代数方程模型）、单方程模型和双方程模型。

第二类是抛弃了湍流输运系数的概念，直接建立湍流应力和其他二阶关联量的输运方程。

第三类是大涡模拟。前两类是以湍流的统计结构为基础，对所有涡旋进行统计平均。大涡模拟把湍流分成大尺度湍流和小尺度湍流，通过求解经过修正的三维 N−S 方程，得到大涡旋的运动特性，而对小涡旋运动还采用上述的模型。

1．系统与控制体

在流体力学中，系统指某一确定流体质点集合的总体。系统以外的环境称为外界。分隔系统与外界的界面，称为系统的边界。系统通常是研究的对象，外界则用来区别于系统。系统将随系统内质点一起运动，系统内的质点始终包含在系统内，系统边界的形状和所围空间的大小可随运动而变化。系统与外界无质量交换，但可以有力的相互作用，及能量（热和功）交换。

控制体指在流体所在的空间中，以假想或真实流体边界包围，固定不动形状任意的空间体积。包围这个空间体积的边界面，称为控制面。控制体的形状与大小不变，并相对于某坐



标系固定不动。控制体内的流体质点组成并非不变的。控制体既可通过控制面与外界有质量和能量交换，也可与控制体外的环境有力的相互作用。

2．质量守恒方程（连续性方程）

在流场中，流体通过控制面A_1流入控制体，同时也会通过另一部分控制面A_2流出控制体，在这期间控制体内部的流体质量也会发生变化。按照质量守恒定律，流入的质量与流出的质量之差应该等于控制体内部流体质量的增量，由此可导出流体流动连续性方程的积分形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_V \rho \mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z + \iint_A \rho v \cdot n\mathrm{d}A = 0 \tag{2-2}$$

式中，V 表示控制体；A 表示控制面。等式左边第一项表示控制体 V 内部质量的增量；第二项表示通过控制表面流入控制体的净通量。

根据数学中的奥-高公式，在直角坐标系下可将其化为微分形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{2-3}$$

对于不可压缩均质流体，密度为常数，则有

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2-4}$$

在圆柱坐标系下，其形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho v_r}{r} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_\theta)}{r\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \tag{2-5}$$

对于不可压缩均质流体，密度为常数，则有

$$\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_\theta}{r\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \tag{2-6}$$

3．动量守恒方程（运动方程）

动量守恒是流体运动时应遵循的另一个普遍定律，描述为：一给定的流体系统，其动量的时间变化率等于作用其上的外力总和，其数学表达式即为动量守恒方程，也称为运动方程，或 N-S 方程，其微分形式表达如下：

$$\begin{cases} \rho\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \rho F_{bx} + \dfrac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \dfrac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \dfrac{\partial p_{zx}}{\partial z} \\ \rho\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \rho F_{by} + \dfrac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \dfrac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \dfrac{\partial p_{zy}}{\partial z} \\ \rho\dfrac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t} = \rho F_{bz} + \dfrac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \dfrac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \dfrac{\partial p_{zz}}{\partial z} \end{cases} \tag{2-7}$$

式中，F_{bz}、F_{by}、F_{yz}分别是单位质量流体上的质量力在 3 个方向上的分量；p_{yx}是流体内应力张量的分量。

动量守恒方程在实际应用中有许多表达形式，其中比较常见的有如下几种。

（1）可压缩粘性流体的动量守恒方程



$$\begin{cases}\rho\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=\rho f_x+\dfrac{\partial p}{\partial x}+\dfrac{\partial}{\partial x}\left\{\mu\left[2\dfrac{\partial u}{\partial x}-\dfrac{2}{3}\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)\right]\right\}+\\ \qquad\dfrac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\dfrac{\partial u}{\partial y}+\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)\right]+\dfrac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\dfrac{\partial w}{\partial x}+\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)\right]\\ \rho\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho f_y+\dfrac{\partial p}{\partial y}+\dfrac{\partial}{\partial y}\left\{\mu\left[2\dfrac{\partial v}{\partial y}-\dfrac{2}{3}\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)\right]\right\}+\\ \qquad\dfrac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\dfrac{\partial v}{\partial z}+\dfrac{\partial w}{\partial y}\right)\right]+\dfrac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\dfrac{\partial u}{\partial y}+\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)\right]\\ \rho\dfrac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}=\rho f_z+\dfrac{\partial p}{\partial z}+\dfrac{\partial}{\partial z}\left\{\mu\left[2\dfrac{\partial w}{\partial z}-\dfrac{2}{3}\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)\right]\right\}+\\ \qquad\dfrac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\dfrac{\partial w}{\partial x}+\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)\right]+\dfrac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\dfrac{\partial v}{\partial z}+\dfrac{\partial w}{\partial z}y\right)\right]\end{cases} \tag{2-8}$$

（2）常粘性流体的动量守恒方程

$$\rho\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho F-\mathrm{grad}p+\frac{\mu}{3}\mathrm{grad}(\mathrm{div}v)+\mu\nabla^2 v \tag{2-9}$$

（3）常密度常粘性流体的动量守恒方程

$$\rho\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho F-\mathrm{grad}p+\mu\nabla^2 v \tag{2-10}$$

（4）无粘性流体的动量守恒方程（欧拉方程）

$$\rho\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho F-\mathrm{grad}p \tag{2-11}$$

（5）静力学方程

$$\rho F=\mathrm{grad}p \tag{2-12}$$

（6）相对运动方程　在非惯性参考系中，相对运动方程是研究像大气、海洋及旋转系统中流体运动所必须考虑的。由理论力学得知，绝对速度v_a为相对速度v_τ及牵连速度v_c之和，即$v_a=v_\tau+v_c$，其中，$v_c=v_0+\Omega\times r$，v_0为运动系中的平动速度，Ω是其转动角速度，r为质点矢径。

而绝对加速度a_a为相对加速度a_r、牵连加速度a_e及科氏加速度a_c之和，即

$$a_a=a_r+a_e+a_c \tag{2-13}$$

式中，$a_e=\dfrac{\mathrm{d}v_0}{\mathrm{d}t}+\dfrac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t}\times r+\Omega\times(\Omega\times r)$；$a_c=2\Omega\times v_r$。

将绝对加速度代入运动方程，即得到流体的相对运动方程：

$$\rho\frac{\mathrm{d}v_r}{\mathrm{d}t}=\rho F_b+\mathrm{div}P-a_c-2\Omega v_r \tag{2-14}$$

4．能量守恒方程

将热力学第一定律应用于流体运动，把式（2-14）各项用有关的流体物理量表示出来，即是能量方程：



$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E+p)]=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[k_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial x_i}-\sum_{j'}h_{j'}J_{j'}+u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}}\right]+S_h \tag{2-15}$$

式中，$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{u_i^2}{2}$；$k_{\text{eff}}$ 是有效热传导系数，$k_{\text{eff}}=k+k_t$，其中 k_t 是湍流热传导系数，根据所使用的湍流模型来定义；$J_{j'}$ 是组分 j 的扩散流量；S_h 包括了化学反应热以及其他用户定义的体积热源项；方程右边的前 3 项分别描述了热传导、组分扩散和粘性耗散带来的能量输运。

在实际计算时，还要考虑不同的流态，如层流与湍流。在下面的章节中将会详细介绍湍流模型。

▷▷▷ 2.1.3　常用的 CFD 商用软件

自 1981 年以来，出现了一系列的 CFD 通用软件，如 PHOENICS、FLUENT、STAR-CD、CFX-TASCflow 与 NUMECA 等。PHOENICS 软件是最早推出的 CFD 通用软件，FLUENT、STAR-CD 与 CFX-TASCflow 是目前国际市场上的主流软件，而 NUMECA 使 CFD 通用软件的应用普及更上一层楼。这些软件通常具有的显著特点如下：

- 应用范围广，适用性强，几乎可以处理工程界各种复杂的问题。
- 前后处理系统以及与其他 CAD、CFD 软件的接口能力比较简单易用，便于用户快速完成造型、网络划分等工作。同时，用户还可以根据个人需要扩展自己的开发模块。
- 具有较完善的容错机制和操作界面，稳定性较高。
- 可在多种计算机操作系统以及并行环境下运行。

1．PHOENICS 软件

PHOENICS（Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series）软件是世界上第一套计算流体动力学与传热学的商用软件。由 CFD 著名学者 D. B. Spalding 和 S. V. Patankar 等提出，以低速热流输运现象为主要模拟对象，目前主要由 Concentration Heat and Momentum Limited（CHAM）公司开发。除了 CFD 软件的基本特征之外，PHOENICS 软件还具有自己独特的功能：

- 开放性。这个软件附带了从简到繁的大量计算实例，一般的工程应用问题几乎都可以从中找到相近的范例，再作一些修改就可计算用户的课题，所以能给用户带来极大方便。
- 多种模型选择。PHOENICS 包含的湍流模型、多相流模型、燃烧与化学反应模型等相当丰富，其中有不少原创性的成分，如将湍流与层流成分假设为两种流体的双流体湍流模型 MFM、专为组件杂陈的狭小空间（如计算机箱体）内的流动和传热计算而设计的代数湍流模型 LVEL 等。
- 多种模块选择。PHOENICS 提供了多种专用模块，用于特定领域的分析计算。例如，暖通空调计算模块 FLAIR 被广泛应用在小区规划设计以及高大空间建筑的设计模拟；英国集成环境公司（IES）的虚拟环境软件，就用它来模拟局部空间的热流现象。
- 双重算法选择。可采用欧拉算法和基于粒子运动轨迹的拉格朗日算法。

1 P1
第 2 章 流体流动分析软件概述
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

- 直角形网格（笛卡儿网格）。PHOENICS 提供了网格局部加密功能与网格被边界切割的补偿功能。
- 优良性价比。软件的价格比其他 CFD 通用软件低得多，其高性价比使之成为国内用户最多的软件。

2．CFX 软件

CFX 软件是全球第一个通过 ISO9001 质量认证的大型商业 CFD 软件，由英国 AEA Technology 公司开发，2003 年被 ANSYS 公司收购。目前，CFX 软件已经遍及航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、火灾安全、冶金、环保等领域，为其在全球的用户解决了大量的实际问题。

诞生在工业应用背景中的 CFX 软件一直将精确的计算结果、丰富的物理模型、强大的用户扩展性作为其发展的基本要求，并以其在这些方面的卓越成就，引领着 CFD 技术的不断发展。与一些 CFD 软件不同的是：

- 除了使用有限体积法外，CFX 软件还采用了基于有限元的有限体积法。
- 可以直接访问各种 CAD 软件，如 CADDS5、CATIA、Eucllid3、Pro/ENGINEER 和 Unigraphics，并从任意 CAD 系统如 MSC/PATRAN 和 I−DEAS 中，以 IGES 格式直接读入 CAD 图形。
- 采用 ICEM CFD 前处理模块，在生成网络时，可实现边界层网格自动加密、流场变化剧烈域网格局部加密、分离流模拟等。
- 可计算的问题包括大批复杂现象的实用模型，并在其湍流模型中纳入了 k−ε 模型、低雷诺数 k−ε 模型、代数雷诺应力模型、大涡模型等多种模型。

3．STAR−CD 软件

STAR−CD 软件最初是由流体力学鼻祖——英国帝国理工大学计算流体力学领域的专家开发的，他们根据传统传热基础理论，合作开发了基于有限体积算法的非结构化网格计算程序。在完全不连续网格、滑移网格和网格修复等关键技术上，STAR−CD 又经过来自全球 10 多个国家，超过 200 名知名学者的不断补充与完善，成为同类软件中网格适应性、计算稳定性和收敛性最好的软件之一。最新湍流模型的推出使得其在计算的稳定性、收敛性和结果的可靠性等方面又得到了显著提高。其基本特征如下：

- 前处理器有较强的 CAD 建模功能，与当前流行的 CAD/CAE 软件有良好的接口，可有效地进行数据转换。
- 具有多种网格划分技术（如 Extrusion、Multi−block、Data Import 等）和网格局部加密技术，能够很好地适应复杂计算区域，处理滑移网格的问题。
- 多种高级湍流模型，具有低阶和高阶的差分格式。
- 后处理器具有动态和静态显示计算结果的功能。能用速度矢量图来显示流动特性，用等值线图或颜色来表示各个物理量的计算结果。

4．FIDAP 软件

FIDAP 软件是由英国 Fluid Dynamics International（FDI）公司开发的计算流体力学与数值传热学的软件。它是一种基于有限元方法和完全非结构化网络的通用 CFD 软件，可解决从不压缩到可压缩范围内的复杂流动问题。FIDAP 软件具有强大的流固耦合功能，可以分析由流动引起的结构响应问题，还适合模拟动边界、自由表面、相变、电磁效应等复杂流动问



题。FIDAP 软件的典型应用领域包括汽车、化工、玻璃应用、半导体、生物医学、冶金、环境工程、食品等行业。其独特之处在于：

- 完全基于有限元方法，不但可以模拟广泛的物理模型，而且对于质量源项、化学反应等其他复杂现象都可以精确模拟。
- 具有自由表面模型功能，可同时使用变形网格和固定网格。也可以导入 I-DEAS、PATRAN、ANSYS、ICEM CFD 等软件生成的网格模型。
- 具有流固耦合分析功能，可同时使用固体结构中的变形和应力，从而模拟液气界面的蒸发与冷凝相变、材料填充、流面晃动等现象。

5．FLUENT 软件

本书着重介绍了该软件，其详细内容可参考以下章节。

2.2　FLUENT 软件简介

FLUENT 软件是由美国 FLUENT 公司于 1983 年推出的 CFD 软件，可计算涉及流体、热传递以及化学反应等工程问题。由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术，所以 FLUENT 软件能达到最佳的收敛速度和求解精度。灵活的非结构化网格和基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型，使 FLUENT 软件在转捩与湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工、燃料电池等方面有广泛应用。例如，井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚积、多相流、管道流动等。

在工程应用上，FLUENT 软件主要可以用在以下几个方面：

- 过程和过程装备应用。
- 油/气能量的产生和环境应用。
- 航天和涡轮机械的应用。
- 汽车工业应用。
- 热交换应用。
- 电子/供热通风与空气调节（HVAC）的应用。
- 材料处理应用。
- 建筑设计和火灾研究。

简而言之，FLUENT 软件适用于各种复杂外形的可压和不可压流动计算。对于不同的流动领域和模型，FLUENT 公司还提供了其他几种解算器，其中包括 NEKTON、FIDAP、POLYFLOW、ICEPAK 以及 MIXSIM。

2.2.1　FLUENT 系列软件介绍

相对于其他专业化的 CFD 分析软件，FLUENT 的专业化和功能性最强，其系列软件皆采用 FLUENT 公司自行研发的 GAMBIT 前处理软件来建立几何形状及生成网格，是一个具有超强组合建构模型能力的前处理器。另外，TGrid 和 Filters（Translators）是独立于 FLUENT 的前处理器，其中 TGrid 用于从现有的边界网络生成体网络，Fliters 可以转换由其他软件生成的网络从而用于 FLUENT 计算。

1 P1
第 2 章 流体流动分析软件概述
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

1．GAMBIT：专用的 CFD 前处理器（几何/网格生成）

GAMBIT 是目前 CFD 分析中最好的前处理器，它包括先进的几何建模和网格划分方法。借助功能灵活、完全集成的和易于操作的界面，GAMBIT 可以显著减少 CFD 应用中的前处理时间。复杂的模型可直接采用 GAMBIT 固有几何模块生成，或由 CAD/CAE 构型系统输入。高度自动化的网格生成工具保证了最佳的网格生成，如结构化的、非结构化的、多块的或混合网格。

2．FLUENT：基于非结构化网格的通用 CFD 求解器

FLUENT 采用可选的多种求解方法，从压力修正的 Simple 法到隐式和显式的时间推进方法并加入了当地时间步长、隐式残差光滑、多重网格加速收敛。可供选择的湍流模型从单方程、双方程直到雷诺应力和大涡模拟。应用的范围包括高超声速流动、跨声速流动、传热传质、剪切分离流动、涡轮机、燃烧、化学反应、多相流、非定常流动、搅拌混合等问题。FLUENT 6.3 是基于完全并行平台的计算工具，既可应用在超级并行计算机上，又可实现高速网络的分布式并行计算，大大增强了计算能力，具有广阔的应用前景。

3．FIDAP：基于有限元方法的通用 CFD 求解器

FIDAP 软件是一流的流固耦合分析软件，将有限元方法应用于 CFD 领域，应用于聚合体处理、薄膜涂层、生物医学、半导体结晶生长、冶金、玻璃处理等领域。

4．POLYFLOW：针对粘弹性流动的专用 CFD 求解器

POLYFLOW 是基于有限元的 CFD 求解器，其特点是拥有强大的粘弹性计算模块，主要应用于聚合物处理领域，如挤型模设计、吹塑、光纤抽丝等问题。

5．MIXSIM：针对搅拌混合问题的专用 CFD 软件

MIXSIM 软件内置了专用前处理器，可迅速建立搅拌器和混合器的网格及计算模型。

6．ICEPAK：专用的热控分析 CFD 软件

ICEPAK 软件是一个完全交互式、面向电子冷却领域的热分析软件。借助 ICEPAK 软件的设计环境可以减少设计成本、缩短高性能电子系统的上市时间。ICEPAK 软件提供了丰富的物理模型，如可以模拟自然对流、强迫对流和混合对流、热传导、热辐射、流–固的耦合换热、层流、湍流、稳态、非稳态等流动现象。另外，ICEPAK 软件还提供了其他分析软件所不具备的许多功能，如模型真实的几何、真实的风机曲线、真实的物性参数等。ICEPAK 软件提供了其他分析软件包不具备的能力，它包括精确的模拟非矩形设备、接触阻力、各向异性热传导率、非线形风扇曲线、散热设备、外部热交换器以及在辐射传热中 View Factor 的自动计算。

如图 2–1 和图 2–2 所示，最基本的流体数值模拟可以通过以上的软件合作完成。

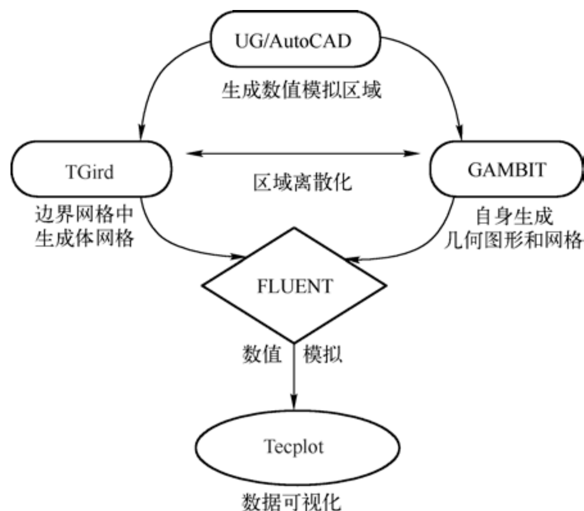


图 2–1　各软件之间的关系图

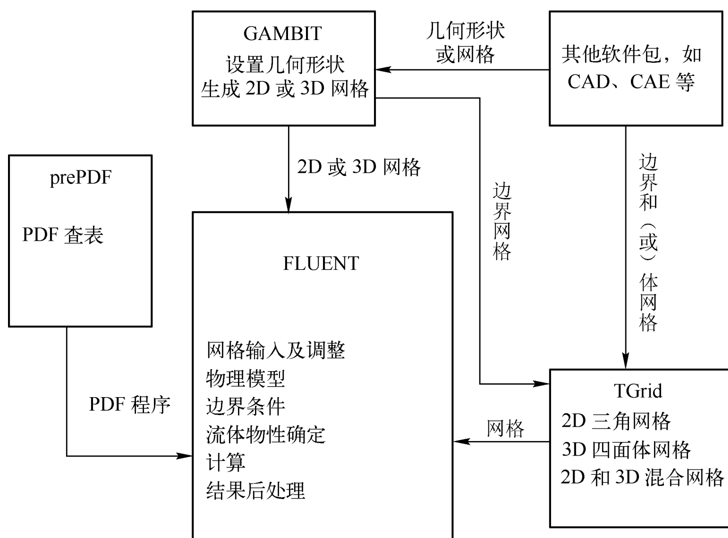


图 2-2　FLUENT 软件的构成

2.2.2　FLUENT 软件的结构及特点

1．FLUENT 软件的结构

FLUENT 软件设计基于 CFD 计算机软件群的概念，针对每一种流动的物理问题的特点，采用适合于它的数值解法以在计算速度、稳定性和精度等方面达到最优。

FLUENT 软件的结构由前处理、求解器及后处理三大模块组成。FLUENT 软件采用 GAMBIT 作为专用的前处理软件，使网格可以有多种形状。对二维流动可以生成三角形和矩形网格；对于三维流动可以生成四面体、六面体、三角柱和金字塔等网格；结合具体计算，还可以生成混合网格。其自适应功能，能对网格进行细分或粗化，或生成不连续网格、可变网格和滑动网格。

FLUENT 软件采用的二阶上风格式是 Barth-Jespersen 方法创始人 T.J.Barth 与 D.C.Jespersen 针对非结构网格提出的多维梯度重构法，后来进一步发展，采用最小二乘法估算梯度，能较好地处理畸变网格的计算。FLUENT 软件率先采用非结构网格使其在技术上处于领先。

FLUENT 软件的核心部分是 N-S 方程组的求解模块。用压力校正法作为低速不可压流动的计算方法，包括 SIMPLE、SIMPLER、SIMPLEC、PISO 等。采用有限体积法离散方程，其计算精度和稳定性都优于传统编程中使用的有限差分法。离散格式为对流项二阶迎风插值格式——QUICK 格式（Quadratic Upwind Interpolation for Convection Kinetics scheme），其数值耗散较低，精度高且构造简单。而对可压缩流动采用耦合法，即连续性方程、动量方程、能量方程联立求解。湍流模型是包括 FLUENT 软件在内的 CFD 软件的主要组成部分。

FLUENT 软件配有各种层次的湍流模型，包括代数模型、一方程模型、二方程模型、湍应力模型、大涡模拟等。应用最广泛的二方程模型是 k-ε 模型，软件中收录有标准 k-ε 模型及其几种修正模型。

FLUENT 软件的后处理模块具有三维显示功能可展现各种流动特性，并能以动画功能演



示非定常过程，从而以直观的形式展示模拟效果，便于进一步分析。该软件的使用步骤如图2−3 所示。

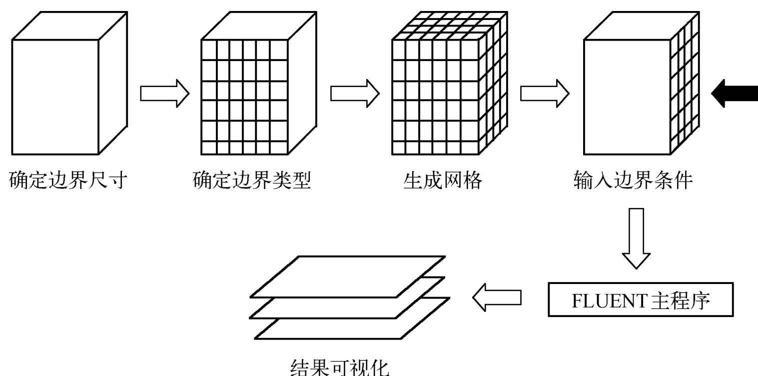


图 2−3　FLUENT 软件使用步骤

FLUENT 软件应用程序有如下的模拟能力：

- 无粘流、层流、湍流模型。
- 适用于牛顿流体、非牛顿流体。
- 强制/自然/混合对流的热传导，固体/流体的热传导、辐射。
- 化学组分的混合/反应。
- 自由表面流模型、欧拉多相流模型、混合多相流模型、颗粒相模型、空穴两相流模型、湿蒸汽模型。
- 融化、熔化/凝固。
- 蒸发/冷凝相变模型。
- 离散相的拉格朗日跟踪计算。
- 非均质渗透性、惯性阻抗、固体热传导，多孔介质模型（考虑多孔介质压力突变）。
- 风扇和散热器等以热交换器为对象的集中参数模型。
- 基于精细流场解算的预测流体噪声的声学模型。
- 质量、动量、热、化学组分的体积源项。
- 复杂表面形状下的自由面流动。
- 磁流体模块主要模拟电磁场和导电流体之间的相互作用问题。
- 连续纤维模块主要模拟纤维和气体流动之间的动量、质量以及热的交换问题等。

2．FLUENT 软件的特点

- 提供了非常灵活的网络特性。例如，三角形、四边形、四面体、六面体、金字塔形网格，如图 2−4 所示。
- FLUENT 软件使用 GAMBIT 作为前处理软件，来读取多种 CAD 软件的三维几何模型以及多种 CAE 软件的网格模型。FLUENT 软件可用于二维平面、二维轴对称和三维流动分析，可完成多种参考体系下流场模拟、定常和非定常流动分析、不可压流和可压流计算、层流和湍流模拟、传热和热混合分析、化学组分混合和反应分析、多相流分析、固体与流体耦合传热分析、多孔介质分析等，它的湍流模型包括 k−ε 模



型、Reynolds 应力模型、LES 模型、标准壁面函数、双层近壁模型等。

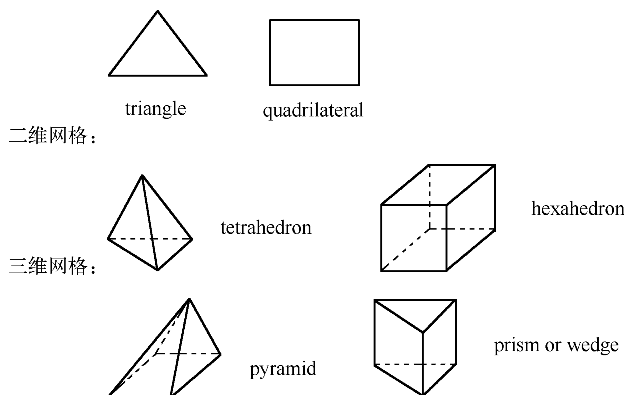


图 2-4　FLUENT 软件的基本控制体形状

- FLUENT 软件可以自定义多种边界条件，如流动入口以及出口边界条件、壁面边界条件等，可采用多种局部的笛卡儿和圆柱坐标系的分量输入，所有边界条件均可以随空间和时间变化，包括轴对称和周期变化等。FLUENT 软件提供的用户自定义子程序功能，可让用户自行设定连续方程、动量方程、能量方程或组分输运方程中的体积源项，自定义边界条件、初始条件、流动的物性、添加新的标量方程和多孔介质模型等。
- FLUENT 软件是用 C 语言编写的，实现高效的并行数据结构，具有很大的灵活性与很强的处理能力。此外，FLUENT 软件使用 Client/Server 结构，它允许同时在用户桌面工作站和高性能的服务器上并行地运行程序。
- FLUENT 软件中解的计算与显示可以通过交互式的用户界面来完成。用户界面是通过 Scheme 语言编写成的。高级用户可以通过写菜单宏及菜单函数自定义及优化界面，还可以使用基于 C 语言的用户自定义函数功能对 FLUENT 软件进行扩展。

此外，FLUENT 6.3 还具有其他独有的特点：

- 可以方便设置惯性或非惯性坐标系、复数基准坐标系、滑移网格以及动静翼互相作用模型化后的连续界面。
- 内部集成丰富的物性参数数据库，含有大量的材料可供选用，用户可以方便地自定义材料。
- 具有高效率的并行计算功能，提供多种自动/手动分区算法；内置 MPI 并行计算机制可大幅度提高并行效率。
- 具有友好的用户界面，提供了二次开发接口，即用户自定义函数（UDF）。
- 含有后处理和数据输出功能，可以对计算结果进行处理，生成可视化图形以及相应的曲线、报表等。

2.3　FLUENT 6.3 软件包的安装及运行

FLUENT 软件在使用过程中需配套使用前处理软件 GAMBIT、后处理软件 Tecplot 和模

1 P1
第 2 章 流体流动分析软件概述
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

拟 UNIX 环境的 EXCEED。下面具体介绍 FLUENT 软件包的安装步骤和注意事项。

2.3.1 FLUENT 6.3 软件包的安装

1．EXCEED 的安装

EXCEED 的安装与常见软件类似。

（1）假设 F 盘是光盘驱动器，进入 F:\EXCEED\XSERVER 目录，双击启动 setup.exe，软件开始对安装环境进行初始化。

（2）软件提示是否同意用户协议，单击 I agree（我同意）按钮进入下一步。

（3）指定安装主目录，如 D:\Program Files\Exceed.nt。

（4）指定用户目录，如 D:\Program Files\Exceed.nt\user。

（5）安装程序开始向硬盘复制文件，结束时会提示重新启动计算机。

（6）重新启动计算机就可以使用 EXCEED 了。

因为 EXCEED 仅用于为 GAMBIT 提供一个模拟的 UNIX 环境，所以这里不对 EXCEED 做过多的介绍，详细介绍可以参考 EXCEED 的用户手册。

2．GAMBIT 的安装

GAMBIT 的安装与 FLUENT 类似。在安装完 FLUENT 后，单击进入安装盘上的 GAMBIT 目录，找到 setup.exe 文件，双击启动这个安装文件，即开始安装 GAMBIT。经过与 FLUENT 安装类似的工作目录选择、工作组名称选择等设置后，安装程序开始向硬盘复制程序，复制结束后，安装过程就结束了。

3．FLUENT 的安装

（1）首先在 C 盘上创建目录 C:\flexlm，然后将软件公司提供的 license.dat 文件复制到这个目录下。

（2）将 FLUENT 的安装光盘放入光盘驱动器，然后双击 setup.exe 文件启动安装程序，设置好安装目录、工作组名称等选项后，安装程序开始向硬盘复制文件。

（3）文件复制结束后，在弹出的工作组窗口中双击运行 set environment，设置好环境变量，再将 license（软件使用许可证）服务器的地址设置完毕，重新启动计算机就可以启动 FLUENT 了。

这里需要说明的是，FLUENT 与我们以往使用的软件不同之处是其安装过程中不需要使用安装密码，而是在每次启动软件之前，通过互联网在 license 服务器上进行软件合法性验证，只有通过验证才能使用。

4．Tecplot 的安装

Tecplot 的安装与 Windows 下的常见软件安装一样。

（1）在安装文件所在目录里，双击 setup.exe 文件开始安装。

（2）按照提示单击 NEXT（下一步）按钮，在用户许可协议页面中单击 I agree（我同意）按钮，表示同意上述协议。

（3）在许可代码栏中填入代码。

（4）选择安装目录。

（5）开始复制文件。

（6）文件复制结束后，重新启动计算机。



2.3.2　FLUENT 6.3 软件包的运行

1．EXCEED 的启动

在运行 GAMBIT 前，需要先启动 EXCEED。启动方法是在 Windows 的“开始”菜单中依次选择：“开始”→“程序”→“EXCEED”→“EXCEED”。在 GAMBIT 的最新版本中，可以用批命令的方式同时启动 EXCEED 和 GAMBIT。

2．GAMBIT 的启动

GAMBIT 需要在 UNIX 系统下运行。因此，为了在 Windows 下运行需要安装 EXCEED 为 GAMBIT 提供一个模拟的 UNIX 环境。

GAMBIT 的启动方式有两种：一种是在 Windows 系统的“开始”菜单中的“运行”栏里面直接输入命令 gambit-id project（project 是可以任意给定的项目名称）；另一种是在 DOS 环境中，在命令行中输入上述命令启动 GAMBIT。

3．FLUENT 的启动

以 Windows NT 为内核的操作系统包括 Windows 2000 和 Windows XP，其启动方式有两种。

（1）从 Windows 的“开始”菜单中启动　顺序单击“开始”→“程序”→“FLUENT Inc.”→“FLUENT 6.3”，就可以启动 FLUENT。

（2）从 DOS 终端窗口启动　在命令行中：

1）输入“FLUENT 2d”，启动二维单精度计算。

2）输入“FLUENT 3d”，启动三维单精度计算。

3）输入“FLUENT 2ddp”，启动二维双精度计算。

4）输入“FLUENT 3ddp”，启动三维双精度计算。

如果想启动并行计算模式，则可以在上述 4 个命令后面加上-tx 参数，其中 x 是并行计算的 CPU 数量，如输入“FLUENT 3d-t3”意思是在 3 个处理器上运行三维计算。

4．Tecplot 的启动

双击桌面上的图标，或者在“开始”菜单中找到 Tecplot，并单击启动软件。Tecplot 需要大约 30MB 的硬盘空间，可以在 Windows 系列操作系统下正常运行。

另外，在运行 FLUENT 软件包时，会经常遇到以下形式的文件。

- .jou 文件：日志文档，可以编辑运行。
- .dbs 文件：GAMBIT 工作文件，若想修改网络，可以打开这个文件进行再编辑。
- .msh 文件：GAMBIT 输出的网络文件
- .cas 文件：是.msh 文件经过 FLUENT 处理以后得到的文件。
- .dat 文件：FLUENT 计算数据结果的数据文件。

2.4　FLUENT 6.3 的功能模块和分析过程

2.4.1　FLUENT 6.3 的功能模块

一套基本 FLUENT 软件包含了两个部分，即 GAMBIT 和 FLUENT。GAMBIT 的主要功



能是几何建模和网格划分，FLUENT 的功能是流场的解算及后置处理。此外，还有专门针对旋转机械的几何建模及网格划分模块 GAMBIT/Turbo 及其他专门用途的功能模块。

- Geometry Modeling（几何生成模块），GAMBIT 具有完整的建模手段，可以生成复杂的几何模型。
- Mesh Generation（网格生成），对几何实体划分网格，可以生成结构化、非结构化及混合类型的网格。
- CAD/CAE Interface（CAD/CAE 接口），从其他 CAD/CAE 软件中导入建好的几何模型或网格。
- User Interface（用户界面），图形用户的界面，使用户操作更为方便，简单。
- FLUENT&Post（FLUENT 和后处理）。
- General Modeling Capabilities（基本建模能力、生成物理模型），基本的流场模拟能力，针对不同的物理现象，可以再选用特定的物理模型进行数值模拟。
- Mesh Capabilities（网格读入能力，处理结构和非结构网格），可以处理结构化与非结构化的网格。
- Numerical Methods（数值求解方法），包含了 3 种流场的数值解算方法：非耦合隐式算法、耦合显式算法、耦合隐式算法。分别适用于从不可压、亚声速、跨声速、超声速乃至高超声速流动。
- Turbulence Modeling（湍流模型），包含了多种湍流模型，针对不同的问题可以采用更恰当的模型进行模拟。
- Chemical Reaction & Combustion Modeling（化学反应、燃烧模型），包含了多种化学反应及燃烧模型，如有限速率、PDF、层流火焰、湍流火焰等多种模型可供选用，可以用来模拟航空发动机燃烧室。
- Radiation Heat Transfer（辐射传热模型），处理辐射换热的模型，共有 5 种。
- Multiphase Modeling（多相流模型），处理流场域中有多相流体存在时的流动，可以同时处理气液固三相同时存在时的流动，其中包含 VOF 模型、Mixture 模型、Euler 模型、Cavitation 模型等。
- Lagrangian Dispersed Phase Modeling（稀疏多相流模型），主要用来模拟一些二次相的体积含量小于 10%的多相流动。
- Nox &Soot 模块（污染物模型）。
- Boundary Conditions（边界条件），FLUENT 内有 10 多种边界条件可供选择，可以赋予不同的计算域边界特定的属性，以确定流动的特性。
- Material Properties（物性参数），内置了一个材料库，里面有大量的材料可供选用，此外用户可以非常方便地定制自己的材料。
- Acoustic（噪声模型）。
- Moving mesh（动网络）。
- User-Defined Functions（用户自定义函数），FLUENT 的接口语言是标准的语言，用户可以用 C 语言编写一些特殊的处理模块或算法来处理一些特定的问题。
- Parallel Processing（Multi-Process only）（并行处理，仅对多套 FLUENT 软件包有效），当多 license 存在时，可以采用多处理器进行并行解算，大大提高了计算的



效率。

- Postprocessing & Data Export（后置处理和数据输出），对计算结果进行处理，生成可视化的图形及给出相应的曲线、报表等。
- On-line Help and Documentation（在线帮助和文档），在使用的过程中能随时提供相关的帮助，提高工作效率。

上面列出的内容是一套基本配置 FLUENT 软件的内容，包含了 FLUENT 软件中所有的算法、差分格式、湍流模型、多相流模型、燃烧模型、辐射模型等。下面是一些需要单独购买的功能模块，主要应用于某些特定的专业。

1．GAMBIT/Turbo 模块

该模块主要用于旋转机械的叶片造型及网格划分。该模块是根据 GAMBIT 的内核定制出来的，因此它与 GAMBIT 直接耦合在一起，采用 Turbo 模块生成的叶形或网格，可以直接用 GAMBIT 的功能进行其他方面的操作，从而可以生成更加复杂的叶形结构。例如，对于涡轮叶片，可以先采用 Turbo 生成光叶片，然后通过 GAMBIT 的操作直接在叶片上开孔或槽，也可以通过布尔运算或切割生成复杂的内冷通道等，因此 Turbo 模块可以极大提高叶轮机械的建模效率。

2．Pro/ENGINEER Interface 模块

该模块用于同 Pro/ENGINEER 软件直接传递几何数据、实体信息，提高建模效率。

3．Deforming Mesh 模块

该模块主要用于计算域随时间发生变化情况下的流场模拟，如飞行器姿态的变化过程的流场特性的模拟、飞行器分离过程的模拟、飞行器轨道的计算等。

4．Flow-Induced Noise Prediction 模块

该模块主要用于预测所模拟流动的气动噪声，对于工程应用可用于降噪。例如，在车辆领域或风机等领域用于降低气流噪声。

5．Magnetohydrodynamics 模块

该模块主要用于模拟磁场、电场作用时对流体流动的影响。主要应用在冶金及磁流体发电领域。

6．Continuous Fiber Modeling 模块

该模块主要应用于纺织工业，用于纤维的拉制成型过程的模拟。

▷▷▷ 2.4.2　FLUENT 6.3 的分析过程

当使用 FLUENT 解决某一问题时，首先要考虑如下几点问题：

（1）定义模型目标　从 CFD 模型中需要得到什么样的结果？从模型中需要得到什么样的精度？选择计算模型时如何隔绝所需要模拟的物理系统，计算区域的起点和终点是什么？在模型的边界处使用什么样的边界条件？二维问题还是三维问题？什么样的网格拓扑结构适合解决问题？

（2）物理模型的选取　无粘、层流还是湍流？定常还是非定常？可压流还是不可压流？是否需要应用其他的物理模型？

（3）确定解的程序　问题可否简化？是否使用默认的解的格式与参数值？采用哪种解格式可以加速收敛？使用多重网格计算机的内存是否够用？得到收敛解需要多少时间？

1 P1
第 2 章 流体流动分析软件概述
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

（4）具体解决问题的步骤

第一步，需要几何结构的模型及网格生成。可以使用 GAMBIT 或者一个分离的 CAD 系统产生几何结构模型及网格，也可以用 TGrid 从已有的面网格中产生体网格，或者从相关的 CAD 软件包中生成体网格，然后读入到 TGrid 或者 FLUENT。

第二步，启动 FLUENT 解算器。下面的表 2-1 告诉了我们哪一步需要什么软件。

表 2-1　FLUENT 菜单概述

解 的 步 骤	菜　　单
读入网格	文件菜单
检查网格	网格菜单
选择解算器格式	定义菜单（Define Menu）
选择基本方程	定义菜单
物性参数	定义菜单
边界条件	定义菜单
调整解的控制	解菜单（Solve Menu）
初始化流场	解菜单
计算解	解菜单
结果的检查	显示菜单（Display Menu）&绘图菜单（Plot Menu）报告菜单（Report Menu）
保存结果	文件菜单
网格适应	适应菜单

利用 FLUENT 软件进行求解的具体步骤如下：

1）确定几何形状，生成计算网络（用 GAMBIT，也可以读入其他制定程序生成的网格）。

2）输入并检查网络。

3）选择求解器（2D 或 3D 等）。

4）选择求解的方程：层流或湍流（或者无粘流）、化学组分或化学反应、传热模型等。确定其他需要的模型，如风扇、热交换器、多空介质等模型。

5）确定流体的物性参数。

6）确定边界类型及其边界条件。

7）条件计算控制参数。

8）流场初始化。

9）求解计算。

10）保存结果，进行后处理等。

（5）FLUENT 的求解器　包括 FLUENT 2d（二维单精度求解器）、FLUENT 3d（三维单精度求解器）、FLUENT 2ddp（二维双精度求解器）、FLUENT 3ddp（三维双精度求解器）。

（6）FLUENT 求解方法的选择　包括非耦合求解方法和耦合求解方法。非耦合求解方



法主要用于不可压缩流动或者低马赫数压缩性流体的流动。耦合求解方法则用于高速可压流动。

FLUENT 默认设置为非耦合求解，但对于高速可压流动，或者需要考虑体积力（浮力或者离心力）的流动，求解问题时网格要比较密，建议采用耦合隐式求解方法求解能量和动量方程，可较快地得到收敛解，缺点是需要的内存比较大（是非耦合求解迭代的 1.5~2.0 倍）。如果必须耦合求解，但内存不够时，则可以考虑使用耦合显式解法器求解。该解法器也耦合了动量、能量和组分方程，内存比隐式求解方法的小，但其缺点是收敛时间比较长。

第 3 章　FLUENT 6.3 的使用

本章主要介绍了 FLUENT 软件的基本操作。FLUENT 软件的用法主要分为网格的导入与检查、求解器与计算模型的选择、边界条件的设置、求解计算等几大环节。为读者使用 FLUENT 软件解决问题奠定了基础。

3.1　FLUENT 6.3 的操作界面

FLUENT 6.3 的操作界面有两种：图形界面（GUI）和文本界面（TUI），包括下拉菜单，面板和对话框，还包括文本命令行的界面。

3.1.1　FLUENT 6.3 的启动界面

根据 2.3.2 节中的步骤运行 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择需要用的二维/三维单精度/双精度解算体，单击 Run 按钮，即启动了 FLUENT 6.3，如图 3−1 所示。



图 3−1　FLUENT 6.3 启动图示

3.1.2　FLUENT 6.3 的图形用户界面

FLUENT 6.3 的图形用户界面由控制台窗口、对话框及图形窗口组成，如图 3−2 所示。刚启动 FLUENT 6.3 时只显示控制台窗口。当用户发出某些与网格或图像有关的命令时，FLUENT 6.3 就会打开新的窗口。在执行命令的过程中都会弹出面板或对话框。

1．菜单栏

FLUENT 6.3 的菜单栏如图 3−3 所示。菜单按钮用下拉菜单组织图形界面的层次，用户可以从控制台顶端的菜单栏选择所需的命令，也可以从窗口命令行输入。

FLUENT 软件下拉菜单的使用方法和 Windows 一样。例如，执行 Define 菜单中 Models 命令会出现一个下拉菜单，再选择 Solver…命令，就会显示 Solver（解算格式）对话框，如图 3−4 所示。单击〈Esc〉键退出。

2．对话框

对话框用于完成简单的输入输出任务，如警告、错误和询问。对话框是临时窗口，出现时要对其进行响应。例如，信息提示框告诉人们需要知道的信息，单击 OK 按钮就关闭了；



"警告"对话框用于警告某些潜在问题，并询问是否继续当前操作，如图 3-5 所示。



图 3-2　FLUENT 6.3 的图形用户界面

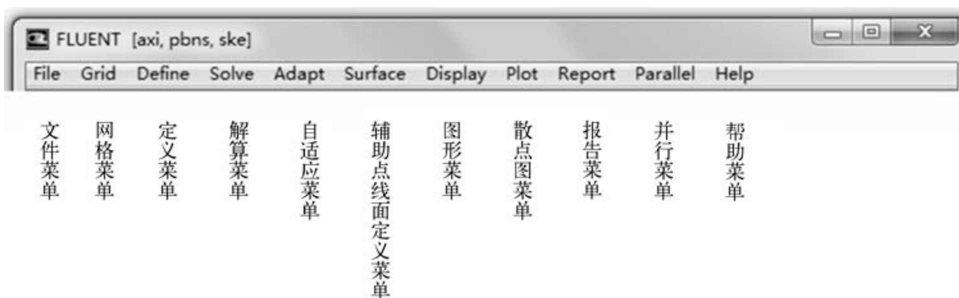


图 3-3　FLUENT 6.3 的菜单栏

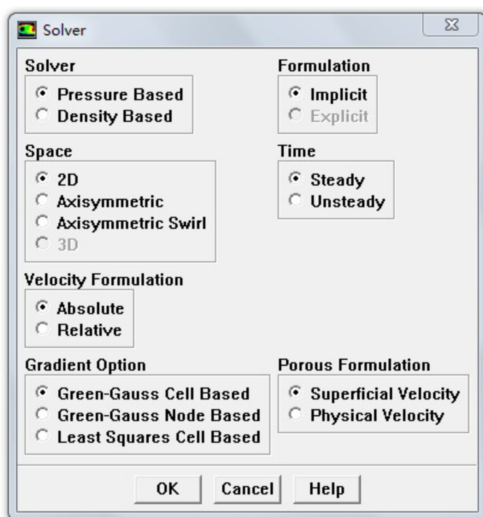
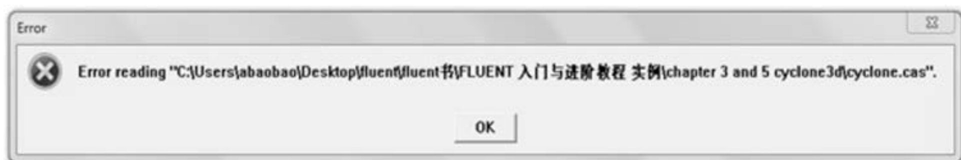
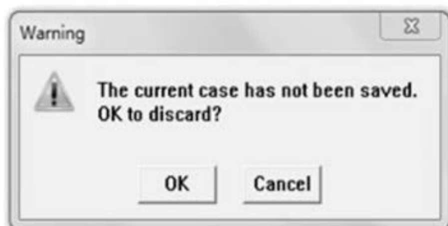


图 3-4　Solver 对话框





错误



警告



询问

图 3-5 “错误”、“警告”和“询问”对话框

3. 面板

面板用于处理复杂的输入任务。和对话框相似，面板也是一个独立的窗口，但是使用面板更像是填充一个表格。每一个面板都是独一无二的，而且使用各种类型的输入控制参数设置。一种面板有两个按钮：OK 按钮表示应用所设置的参数并关闭面板；Cancel 按钮表示关闭面板而且不做任何改变，如图 3-6 所示。

另一种面板是在应用所设置的参数后仍然不关闭面板，这时可以做更多的设置。后处理和自适应网格中经常会出现这样的面板。Apply 按钮表示应用设置不关闭面板，这一按钮还有其他的名称，如在后处理过程中该按钮的名字是 Display，自适应网格中这个按钮的名字是 Adapt。Close 按钮表示关闭面板，如图 3-7 所示。

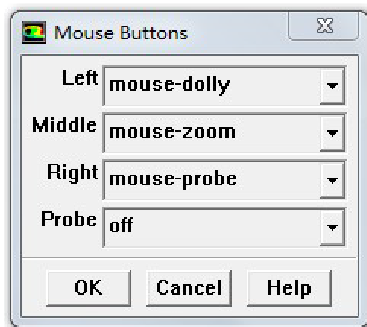


图 3-6 Mouse Buttons 面板

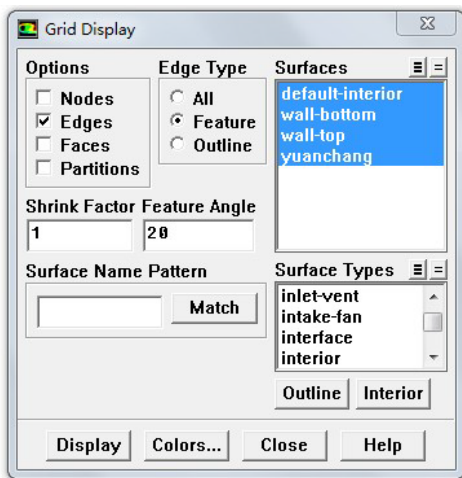


图 3-7 Grid Display 面板

所有的面板都包含 Help 按钮，用于显示如何使用面板的信息。面板中的各种类型输入控制如表 3-1 所示。

表 3-1　面板中的各种类型输入控制

输入控制	视图显示	输入控制	视图显示
Push Button	Close	Text Entry	New Surface Name line-1
Check Button	All Feature Outline	单选列表	Types far-field inlet interior outlet periodic symmetry axis wall free-surface internal
Radio Buttons	Nodes Edges Faces Partitions	多选列表	Surfaces default-interior wall-bottom wall-top yuanchang
Real Number Entry	Density (kg/m3) constant 1.225	下拉菜单	Method skewness
Integer Number Entry	Number of Iterations 4	标尺	1 Frame

4．图形显示窗口

显示选项面板可以控制图形显示的属性，也可以打开另一个显示窗口。鼠标按钮面板可以用于设定鼠标在图形显示窗口单击时所执行的操作。如果要取消显示操作，则可以按〈Ctrl+C〉组合键，已经开始画图就无法取消操作了。

3.1.3　FLUENT 6.3 的文本用户界面及 Scheme 表达式

文本用户界面（TUI）由名为 Scheme 的 Lisp 专业语言编写而成。熟悉 Scheme 的用户能够使用界面的解释功能来创建自定义命令。用户可以借助 FLUENT 6.3 的控制台窗口界面输入各种命令、数据和表达式。

文本菜单系统为程序下的程序界面提供了分级界面。因为它是文本的，所以可以用标准菜单的工具进行操作：输入的命令可以保存在文件中，也可以用文本编辑器修改，或是读入需要执行的命令。因为文本菜单系统与 Scheme 扩展语言紧密结合，所以可直接形成程序来进行复杂的控制或自定义函数。

菜单系统结构和 UNIX 操作系统的目录树很相似。第一次进入 FLUENT 软件，是在根菜单下，菜单的提示符只是一个简单的补字符：“>”。要生成子菜单和命令的列表只需单击〈Enter〉键，效果如图 3-8 所示。

与之相似，进入子菜单，只需输入菜单名字或其简写就可以，提示符也会相应改变为当前菜单的名字：

```
> display
/display> set
/display/set>
```


1 P1
2 P16
第 3 章 FLUENT 6.3 的使用
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

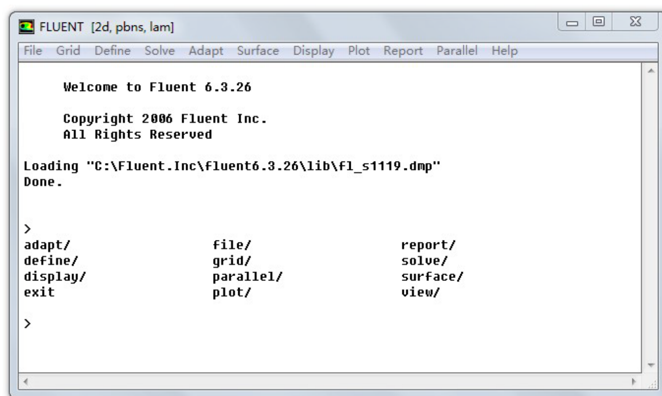


图 3-8 FLUENT 6.3 的面板

要回到上一级菜单只需在命令提示中输入 q 或者 quit：

```
/display/set> q  回车
/display>
```

可以输入菜单全路径名直接进入到另一菜单：

```
/display> /file
/display//file>
```

在上一例中，控制直接从/display 转到/file 而不结束根菜单。因此，当从/file 菜单退出时，控制会直接退回到/display：

```
/display//file> q
/display>
```

而且，如果直接执行一个命令而不结束路径上的任何菜单，则控制会回到调用命令时的菜单：

```
/display> /file start-journal jrnl
Input journal opened on file "jrnl".
/display>
```

在命令提示符下，用户除了可以输入 FLUENT 命令之外，还可以输入由 Scheme 函数组成的具有复杂功能的 Scheme 表达式。

Scheme 表达式的写法有些特别，表达式用括号括起来。括号里面第一个出现的是函数名或者操作符，其他是参数。Scheme 的这种表达式写法可以叫做前置式。下面是一些 Scheme 表达式的例子以及其对应的 C 语言的写法：

```
Scheme C
------------------------------------------------------------------
(+ 2 3 4) (2 + 3 + 4)
(< low x high) ((low < x) && (x < high))
(+ (* 2 3) (* 4 5)) ((2 * 3) + (4 * 5))
```



(f x y) f(x, y)
(define (sq x) (* x x)) int sq(int x) { return (x * x) }

3.1.4　FLUENT 6.3 的图形控制及鼠标使用

使用 DISPLAY 和 PLOT 菜单中相关的命令可以对图形显示内容的选择和属性进行设置。执行 DISPLAY→Contours 命令可以显示压力、速度等物理量云图（或等值线图）；执行 DISPLAY→Options 命令可以对图形窗口的显示属性进行修改。

Windows NT 系统具有特有的输出图形显示窗口功能，如果选择 Windows NT 版本的 FLUENT 软件，则单击图形窗口的左上角便可以显示图形窗口系统菜单，该菜单包括常用系统命令，如 move、size 和 close。连同系统命令一起，FLUENT 6.3 为支持打印机和剪贴板增加了 3 条命令：

（1）复制到剪贴板　将当前图形复制到 Windows 的剪贴板，可以用页面设置面板改变复制的属性。图形窗口的大小影响了图形中所使用的字的大小。

（2）打印　将当前图形复制到打印机。可以用页面设置面板改变打印的属性。

（3）页面设置　显示页面设置面板。

1．页面设置

Windows NT 系统具有独有的页面设置面板功能，执行 system/Page Setup…菜单命令，弹出页面设置面板如图 3-9 所示。该面板各选项功能如下。

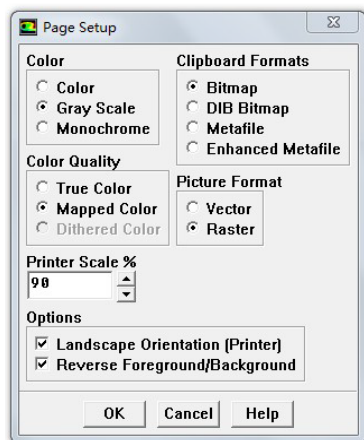


图 3-9　Page Setup 面板

（1）Color 选项组　选择是否使用彩色图，包括下面 3 个单选按钮。

- Color：选择彩色图形。
- Gray Scale：选择灰度比例图。
- Monochrome：选择黑白图。

（2）Color Quality 选项组　指定图形的色彩模式，包括下面 3 个单选按钮。

- True Color：创建一个由 RGB 值定义的图，打印机或者显示器有至少 65536 个色彩或无限色彩。
- Mapped Color：用色彩图创建图形，这对于只有 256 色的设备是一个不错的选择。
- Dithered Color：用 20 个或更少的色彩创建一个颤动图。

（3）Clipboard Formats 选项组　选择所需格式复制到剪贴板。图形窗口的大小会影响剪贴板图形的尺寸。要得到最好的结果最好是调节图形窗口的尺寸并用 Windows 剪贴板查看器检查剪贴板图形，包括下面 4 个单选按钮。

- Bitmap：图形窗口以位图形式复制。
- DIB Bitmap：这是一个与设备有关的图形窗口位图复制。
- Metafile：这是一个 Windows 图元文件。
- Enhanced Metafile：这是一个 Windows 增强图元文件。

（4）Picture Format 选项组　指定光栅和矢量图，包括下面两个单选按钮。

- Vector：创建矢量图，这一格式在打印时有很高的清晰度，但是一些大的 3D 图可能

1 P1
2 P16
第 3 章 FLUENT 6.3 的使用
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254



会花很长时间来打印。

- Raster：创建光栅图，这一格式在打印时有相对较低的清晰度，但是一些大的 3D 图可能会花较少时间来打印。

（5）Printer Scale %调节框　控制打印图形覆盖页面的范围，减少尺度会有效地增加图形页面的空白。

（6）Options 选项组　包括控制图形其他属性的两个复选框。

- Landscape Orientation（Printer）：指定图形的方向。如果选上改选项，图形将会在前景（Landscape）模式中形成，否则是在肖像（Portrait）模式下形成。修改选项只在输出时应用。
- Reverse Foreground/Background：如果选定就会使图形的前景和背景颜色互换。这一功能可以使复制白前景黑背景的图为黑前景白背景。

2．鼠标按键定义

执行 DISPLAY/Mouse Buttons 命令，可以调整鼠标按键的定义。默认的鼠标按键功能是：按住左键拖动为移动图形；按住中建拖动为缩放图形；按住右键拖动为执行用户预定义操作。

3.2　FLUENT 6.3 对网格的基本操作

3.2.1　导入和检查网络

FLUENT 6.3 可以输入各种类型，各种来源的网格，通过各种手段对网格进行修改，如转换和调解节点坐标系，对并行处理划分单元，在计算区域内对单元重新排序以减少带宽以及合并和分割区域等。还可以获取网格的诊断信息，其中包括内存的使用与简化，网格的拓扑结构，解域的信息。除此之外，还可以在网格中确定节点、表面以及单元的个数，并决定计算区域内单元体积的最大值和最小值，而且检查每一单元内适当的节点数。以下详细叙述了 FLUENT 6.3 关于网格的各种功能。

1．网格的导入

FLUENT 6.3 能够处理大量的具有不同结构的网格拓扑结构，如 O 形结构四边形网格、降落伞的零厚度壁面网格、C 形结构四边形网格、机翼的四边形结构网格、多块结构四边形网格、三维多块结构网格、非结构四边形网格、不规则三角形网格、非结构四面体网格、具有悬挂节点的混合型三角形/四边形网格、非一致混合网格都是有效的，如图 3-10~图 3-20 所示。同时有很多可以产生网格的工具，如 GAMBIT、TGrid、GeoMesh、preBFC、ICEMCFD、I-DEAS、NASTRAN、PATRAN、ARIES、ANSYS 以及其他的前处理器，或者使用 FLUENT/UNS、RAMPANT 以及 FLUENT 文件中包含的网格，也可以准备多个网格文件，然后把它们结合在一起创建一个网格。

2．GAMBIT 网格文件

使用 GAMBIT 创建二维和三维结构、二维和三维非结构、二维和三维混合网格。详细内容参阅第 4 章，并将网格输出为 FLUENT 格式。所有这样的网格都可以直接读入到 FLUENT 软件。



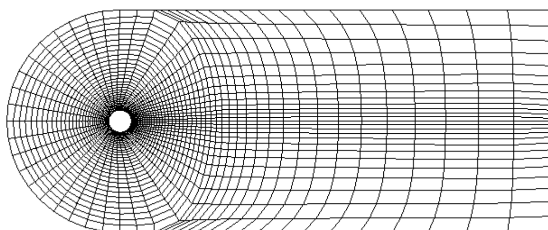


图 3-10　O 形结构四边形网格

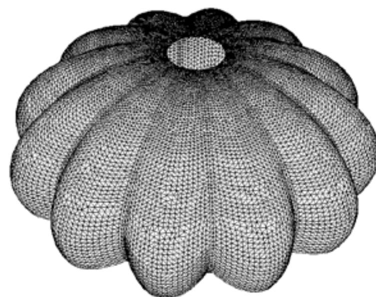


图 3-11　降落伞的零厚度壁面网格

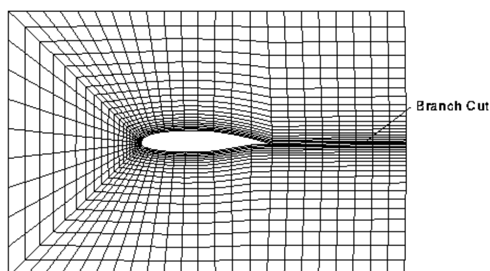


图 3-12　C 形结构四边形网格

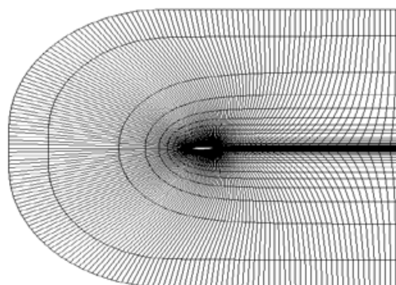


图 3-13　机翼的四边形结构网格

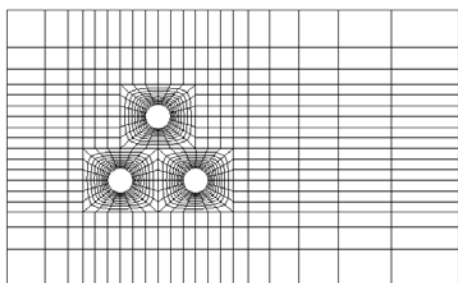


图 3-14　多块结构四边形网格

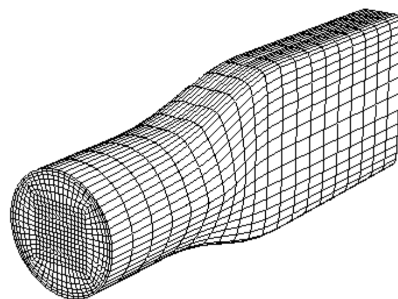


图 3-15　三维多块结构网格

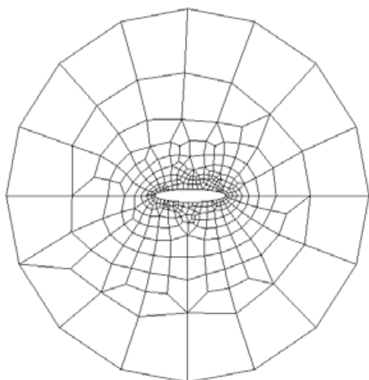


图 3-16　非结构四边形网格

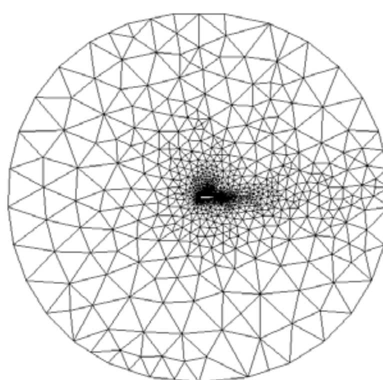
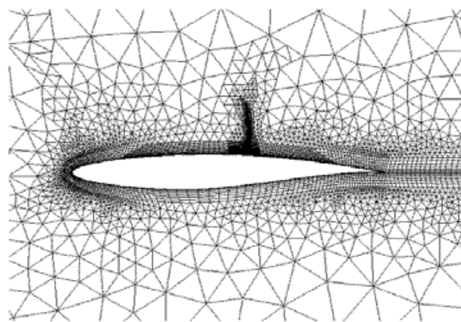


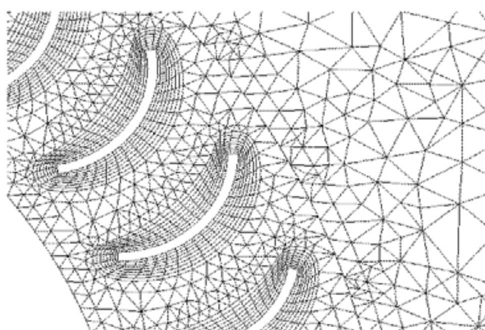
图 3-17　不规则三角形网格

1 P1
2 P16
第 3 章 FLUENT 6.3 的使用
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254




图 3-18　非结构四面体网格


图 3-19　具有悬挂节点的混合型三角形/四边形网格


图 3-20　非一致混合网格

3．GeoMesh 网格文件

使用 GeoMesh 创建二维四边形网格或三角形网格以及三维六面体网格和三维四面体网格的三角网格面。具体参阅 GeoMesh 用户向导。要完成三维四面体网格的创建必须把表面网格读入到 TGrid，然后产生体网格。其他的网格都可以直接读入到 FLUENT 软件。

4．TGrid 网格文件

用 TGrid 从边界或表面网格产生二维或三维非结构三角形/四面体网格。具体方法请参阅 TGrid 用户向导。在 FLUENT 软件中单击 File→Write→Mesh...菜单保存网格。读入网格单击 File→Read→Case...。

5．preBFC 网格文件

用 preBFC 产生两种 FLUENT 软件所使用的不同类型的网格：结构四边形或六面体网格和非结构三角形或四面体网格。

6．ICEMCFD 网格文件

ICEMCFD 可以创建 FLUENT 6.3 的结构网格和 RAMPANT 格式的非结构网格。读入三角形和四面体 ICEMCFD 网格，需要光滑和交换网格以提高该网格的质量。

7．第三方 CAD 软件包产生的网格文件

FLUENT 软件可以使用 fe2ram 格式转换器从其他的 CAD 软件包读入网格，如 I-DEAS、NASTRAN、PATRAN 以及 ANSYS。

8．检查网格

FLUENT 6.3 中的网格检查功能提供了区域范围、体积统计、网格拓扑结构和周期性边



界的信息、单一计算的确认以及关于 *x* 轴的节点位置的确认（对于轴对称算例）。其菜单为 Grid/Check。执行该命令后网格检查信息会出现在控制台窗口，如图 3-21 所示。其中各部分含义如下。



注意　推荐读入解算器之后检查网格的正确性，这样可以在设定问题之前检查任何网格错误。

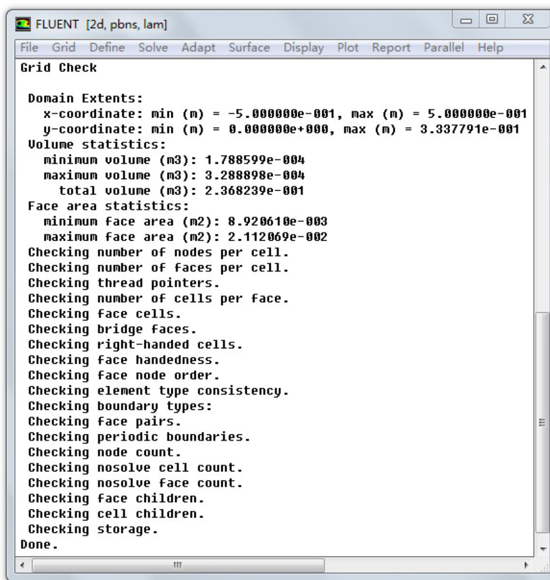


图 3-21　网格检查

（1）区域范围　列出了 *x*、*y* 和 *z* 坐标的最大值和最小值，单位是米。

（2）体积统计　包括单元体积的最大值、最小值以及总体积，单位是立方米。体积为负值表示一个或多个单元有不正确的连接。通常来说，可以用 Iso-Value Adaption 确定负体积单元，并在图形窗口中查看。进行下一步之前这些负体积必须消除。

（3）网格拓扑结构和周期性边界的信息　每一区域的旋转方向将会被检测，区域应该包含所有的右手旋向的面。通常有负体积的网格都是左手旋向。在这些连通性问题没有解决之前无法获得流动的解。最后的拓扑验证是单元类型的相容性。如果不存在混合单元（三角形和四边形或者四面体和六面体混合），FLUENT 软件会确定它不需要明了单元类型，这样做可以消除一些不必要的工作。

对于轴对称算例，在 *x* 轴下方的节点数将被列出。对于轴对称算例来说，*x* 轴下方不应有节点，这是因为轴对称单元的体积是通过旋转二维单元体积得到的，如果 *x* 轴下方有节点，就会出现负体积。

对于具有旋转周期性边界的解域，FLUENT 软件会计算周期角的最大值、最小值、平均值以及规定值。通常容易犯的错误是没有正确地指定角度。对于平移性周期边界，FLUENT 软件会检测边界信息以保证边界确实是周期性的。

（4）证实单一计算　FLUENT 软件会将解算器所建构的节点、面和单元的数量与网格文

件的相应声明相比较，任何不符都会被报告出来。

3.2.2 显示和修改网格

1．网格显示

单击菜单 Grid→Info→Size 可以输出节点数、表面数、单元数以及网格的分区数。图 3-22 所示是一个输出结果。

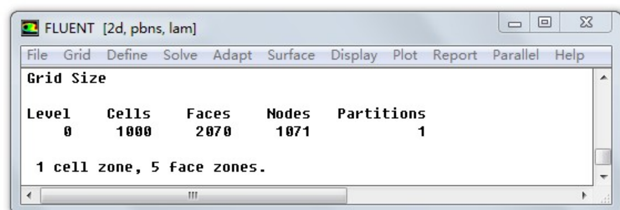


图 3-22 输出结果

单击菜单 Grid→Info→Zones，可以显示不同区域内有多少节点和表面被分开以及对于每一个表面和单元区域来说的表面和单元数、单元的类型，边界条件类型，区域标志等。图 3-23 所示是一个输出结果。

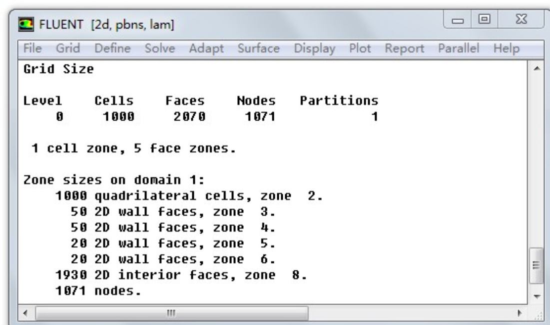


图 3-23 输出结果

要获取划分统计的信息可以单击菜单 Grid→Info→Partitions menu item。统计包括单元数、表面数、界面数和与每一划分相邻的划分数。

2．修改网格

网格被读入之后有几种方法可以修改，如可以标度和平移网格，可以合并和分离区域，创建或切开周期性边界。除此之外，还可以在区域内记录单元以减少带宽，对网格进行光滑和交换处理。并行处理时还可以分割网格。


注意

不论何时修改网格，都应该保存一个新的 case 文件和 data 文件（如果文件存在）。如果想读入旧的 data 文件，也要把旧的 case 文件保留，因为旧的数据无法在新的 case 文件中使用。

（1）标度网格 FLUENT 软件内部存储网格的单位是米——长度的国际单位。当读入网



格时，假定网格的长度单位是米，如果创建网格时使用的是其他长度单位，则必须将网格的标度改为米。标度也可以用于改变网格的物理尺寸。



注意 无论以何种方式标度网格，都必须在初始化流场或开始计算之前完成网格的标度。在标度网格时，任何数据都会无效。单击菜单 Grid→Scale...，出现标度网格（Scale Grid）面板，如图 3-24 所示。

使用标度网格面板的步骤如下：

1）在 Unit Conversion 选项组下，可以在 Grid Was Created In 旁边的下拉列表框中选择适当的单位。标度因子（Scale Factors）会自动被设为正确值（如 0.0254m 或者 0.3048m），如果所用的单位不在列表中，可以手动输入标度因子（如米/码的因子）。

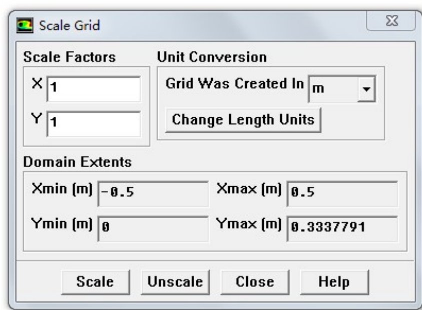


图 3-24 Scale Grid 面板

2）单击 Scale 按钮。区域范围（Domain Extents）会自动更新，并输出正确的单位范围（m）。如果用户希望在 FLUENT 软件进程中使用最初的单位，可以在标度网格面板改变单位。

3）当不改变单位标度网格，只是转换网格点的最初尺寸时，转换方法就是用网格坐标乘以标度因子。如果想要在最初的单位下工作而不将单位改为米，则可以在设定单位面板中单击 Change Length Units（改变长度单位）按钮。单击按钮之后区域范围就会被更新为最初单位的范围。如果使用了错误的标度因子、偶然单击了标度按钮两次或者就是想重新标度，则可以单击 UnScale 按钮。Unscaling 用标度因子去除所有的节点坐标。在创建的网格中选择 m 并且单击 Scale 按钮，是不会重新标度网格的。

除此之外，还可以使用网格标度面板改变网格的物理尺寸。例如，网格是 5in×8in，可以设定标度因子为 2，得到 10in×16in 的网格（1in=0.0254m）。

（2）平移网格　可以指定节点的笛卡儿坐标的偏移量来平移网格。如果网格是通过旋转得到的而不是经过原来的网格得到的，这将对旋转问题很必要。对于轴对称问题，如果网格的设定是由旋转设定而与 x 轴不一致，那么这对旋转问题也很必要。如果想将网格移到特定的点处（如平板的边缘）来画一个距 x 轴有一定距离的 XY 图，单击菜单 Grid→Translate 弹出平移网格（Translate Grid）面板可以平移网格，如图 3-25 所示。

使用平移网格面板平移网格步骤如下：

1）输入偏移量（可以是正负实数）。

2）单击平移按钮，下面的区域范围不可以在这个面板中改变。

（3）合并区域　为了简化解的过程可以将区域合并为一个区域。合并区域包括将具有相似类型的多重区域合并为一个。将相似的区域合并之后，会使设定边界条件以及后处理变得简单。单击菜单 Grid→Merge...弹出的合并区域（Merge Zones）面板如图 3-26 所示。

使用合并区域面板将相同类型的区域合并为一个的步骤如下：

1）在多重区域列表中选择区域类型。这一列表中包括多重区域的所有类型。当选择区域类型之后，相应的区域就会在区域列表中出现。

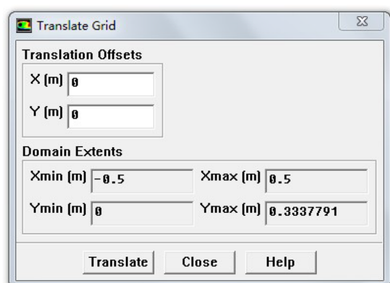


图 3-25　Translate Grid 面板

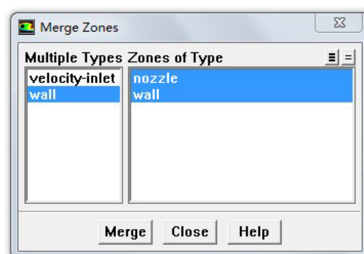


图 3-26　Merge Zones 面板

2）在区域列表中选择两个以上的区域。

3）单击合并按钮，合并所选区域。


注意

一定要记住保存新的 case 文件和 data 文件（如果文件存在）。

（4）分割区域　FLUENT 软件中有几种方法可以将单一表面或者单元区域分为多个同一类型的单元。如果想将一个区域分为几个更小的区域，则可以使用这个功能。例如，对管道创建网格时，创建了一个壁面区域，而这些壁面区域在不同的位置有不同的温度，就需要将这个壁面区域分为两个以上的小区域。


注意

在任何分割处理之后都应该保存一个新的 case 文件。如果 data 文件存在，当分割开始时它们会自动分配到适当的区域，所以要保存新的 data 文件。

表面区域有 4 种分割方法，单元区域有 2 种分割方法。下面先介绍表面区域的分割方法，然后介绍单元分割工具。周期区域的裁剪将在后面介绍。


注意

所有的分割方法在分割之前都可以报告分割的结果。

1）分割表面区域。对于有尖角的几何区域，在具有明显角度的基础上可以很容易分割表面区域。也可以用保存在适应寄存器中的标号分割表面区域。例如，可以在单元所在区域位置（区域适应）的基础上为了适应而标记单元，或者在它们狭窄的边界（边界适应）或者在一些变量等值线或者在其他的适应方法的基础上标记单元。除此之外，还可以在连续性区域的基础上分割表面区域。单击菜单 Grid→Separate→Faces...出现分离表面区域（Separate Face Zones）面板，如图 3-27 所示。


注意

在使用悬挂节点适应方法（默认）进行任何适应之前，应该先分割表面区域。包含悬挂节点的区域不能分割。

分割表面区域的步骤如下：



① 选择分离方法（Angle、Face、Mark 或者 Region）。
② 在区域列表中选择要分离的区域。
③ 如果用表面或者区域分割请跳到下一步，否则请遵照下面的步骤。

- 如果要用角度分割表面，则在角度集合中指定特征角。
- 如果用标记分割表面，则在寄存器列表中选择所要使用的适应寄存器（此步可选）。在分割之前要检查分割结果可单击 Report 按钮。

④ 分离表面区域，单击 Separate 按钮。

2）分割单元区域。如果存在两个及其以上共用内部边界的被包围的单元区域（见图 3-28），但是所有的单元被包含在一个单元区域，则可以用区域分割方法将单元分割为不同的区域。



注意　如果共用边界的类型是内部类型，必须在分割之前把它们改为双边表面区域类型。

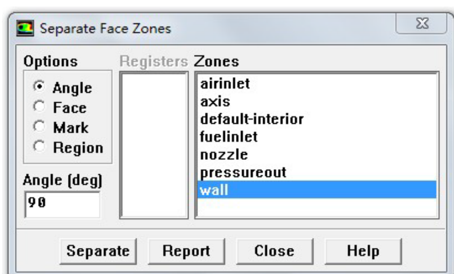


图 3-27　Separate Face Zones 面板

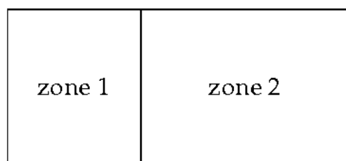


图 3-28　在区域的基础上分割单元区域

也可以用适应寄存器中的标志分割单元区域。可以使用网格适应一章的任何一种适应方法标记单元。当指定了分割单元区域的寄存器之后，被标记的单元会放在新的单元区域（使用管理寄存器面板确定所要使用的寄存器的 ID）。要在区域或适应标志的基础上分割单元区域，可单击菜单 Grid→Separate→Cells…，弹出分割单元区域（Separate Call Zones）面板，如图 3-29 所示。



注意　应该在使用悬挂节点适应方法（默认）进行任何适应之前，先分割表面区域。包含悬挂节点的区域不能分割。

分离单元区域的步骤如下：

① 选择分离方法（Mark 或者 Region）。
② 在区域列表中选择要分离的区域。
③ 如果用标志分割区域，则在寄存器列表中选择适应寄存器（此步可选）。在分割之前要检查分割结果可单击 Report 按钮。
④ 分离表面区域，可单击 Separate 按钮。

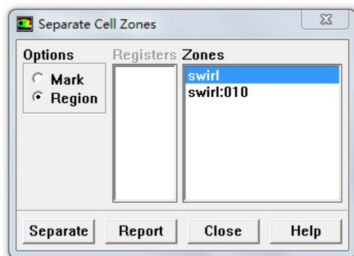


图 3-29　Separate Call Zones 面板

（5）创建周期区域　如果两个区域有相同的节点和表面

1 P1
2 P16
第 3 章 FLUENT 6.3 的使用
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

分布，则可以将这对表面区域耦合来为网格分配周期性。在前处理过程中，必须保证所要分配周期性边界的两个区域具有相同的几何图形和节点分布，即它们是相互的复制。这是在解算器中创建网格周期性区域的唯一需要，两个区域的最初边界类型是不相关的。


注意

在创建和裁剪周期性边界条件之后，保存新的 case 文件（如果有 data 文件也要保存）。要匹配一对边界条件，请使用创建周期性文本命令：Grid→modify-zones→make-periodic。

当创建周期性边界时，解算器会检查所选区域内的表面是否匹配（也就是说相应表面的节点是否一致）。表面匹配的公差是表面边缘最小长度的分数倍。如果周期性边界条件创建失败，则可以用 matching-tolerance 命令改变匹配公差，但是匹配公差不可以超过 0.5，否则周期性区域匹配将不正确，并且会破坏网格。

（6）剪裁（Slit）周期性区域　将周期性成对区域解耦可以使用剪裁周期性命令：Grid→modify-zones→slit-periodic。指定周期性区域的名字或者 ID，解算器就会将两个区域解耦，然后将它们改为两个对称性区域。

（7）融合（Fusing）表面区域　在组合多重网格区域之后，表面融合是一个很方便的功能，它可以将边界融合，将节点和表面合并。当区域被分为子区域，并且每一个子区域分别产生网格时，需要在将网格读入解算器之前，把子区域结合为一个文件。单击菜单 Grid→Fuse...弹出融合表面区域（Fuse Face Zones）面板，允许将双重节点合并，并将人工内部边界删除，如图 3-30 所示。

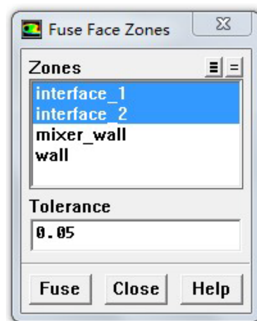


图 3-30　Fuse Face Zones 面板

融合表面区域的步骤如下：

1）在区域列表中选择要融合的区域。

2）单击 Fuse 按钮融合所选区域。

3）如果使用默认公差没有融合所有适当的表面，则应该增加公差尝试重新融合（这一公差和创建周期性区域所讨论的匹配公差一致）。公差不应该超过 0.5。

（8）剪开表面区域　剪开表面区域功能有两种用途：

- 将任何双边类型的单一边界区域剪开为两个不同的区域。
- 将耦合壁面区域剪开为两个不同的非耦合壁面区域。

当剪开表面区域时，解算器会将除了在区域的二维端点或三维边缘节点以外的所有的表面和节点复制。一组节点和表面将会属于剪开之后的一个边界区域，其他的在另一个区域。


注意

裁剪完边界之后，不能再将边界融合。

剪开表面（slitting）命令和分割表面（separating）命令是不同的。剪开表面指剪开表面后附加的表面和节点被创建并放到新的区域。分离表面指新的区域将会被创建，新的节点和表面不会被创建，原表面和节点简单地重新分配到区域中。

（9）记录流域（Domain）和区域（Zones）　记录区域可以通过重新排列内存的节点、



表面以及单元提高解算器的计算性能。Grid 中的 Reorder 菜单包含重新记录 Domain 和 Zones 的命令，并且能够输出目前网格划分的带宽。Domain 的记录可以提高内存的读写效率，并且可以为用户界面很方便地记录区域。带宽提供了查看内存中的单元分布。记录区域菜单为 Grid→Reorder→Domain。最后，选择输出带宽菜单，输出目前网格的划分。输出带宽菜单为 Grid→Reorder→Print Bandwidth。

（10）重排范围和区域　重排范围有助于提高内存的利用效率。重排区域方便用户自定义界面。Grid 中的 Reorder 菜单同时提供带宽的打印，带宽提供对区域和内存中单元网格的分布情况的了解。

3.3　选择 FLUENT 6.3 求解器及运行环境

3.3.1　FLUENT 6.3 求解器的比较与选择

FLUENT 软件的求解器包括二维单精度求解器（FLUENT 2d）、三维单精度求解器（FLUENT 3d）、二维双精度求解器（FLUENT 2ddp）、三维双精度求解器（FLUENT 3ddp）。

大多数情况下，单精度求解器高效准确，但是对于某些问题使用双精度求解器更合适。如果几何图形长度尺度相差太多（比如细长管道），描述节点坐标时单精度网格计算就不合适了；如果几何图形是由很多层小直径管道包围而成（比如汽车的集管）平均压力不大，但是局部区域压力可能相当大（因为只能设定一个全局参考压力位置），此时采用双精度求解器来计算压差就很有必要了。

对于包括很大热传导比率和（或）高比率网格的成对问题，如果使用单精度求解器便无法有效实现边界信息的传递，从而导致收敛性和（或）精度下降，应用双精度求解器。

传统的 FLUENT 软件求解器有 Segregated Solver 算法：该算法适用范围为不可压缩流动和中等可压缩流动。这种算法不对 Navier−Stokes 方程联立求解，而是对动量方程进行压力修正，是一种很成熟的算法，在应用上经过了很广泛的验证。这种方法拥有多种燃烧、化学反应及辐射、多相流模型与其配合，适用于汽车领域的 CFD 模拟。Coupled Explicit Solver 算法主要用来求解可压缩流动。与 SIMPLE 算法不同，它是对整个 Navier−Stokes 方程组进行联立求解，空间离散采用通量差分分裂格式，时间离散采用多步 Runge−Kutta 格式，并采用了多重网格加速收敛技术。对于稳态计算，还采用了当地时间步长和隐式残差光顺技术。该算法稳定性好，内存占用小，应用极为广泛。Coupled Implicit Solver 算法是其他所有商用 CFD 软件都不具备的。该算法也对 Navier−Stokes 方程组进行联立求解，由于采用隐式格式，因而计算精度与收敛性要优于 Coupled Explicit Solver 算法，但却占用较多的内存。该算法另一个突出的优点是可以求解全速度范围，即求解范围从低速流动到高速流动。

在 FLUENT 6.3 中，改用了 Pressure Based（压力）和 Density Based（密度）两个求解器。压力基求解器是从原来的分离式求解器发展来的，按顺序一次求解动量方程、压力修正方程、能量方程和组分方程及其他标量方程，如湍流方程等。和之前不同的是，压力基求解器还增加了耦合算法，可以在分离求解和耦合求解之间自由地转换，耦合求解就是一次求解前述的动量方程、压力修正方程、能量方程和组分方程，然后再求解其他标量方程，如湍流方程等，收敛速度快，但是需要更多内存和计算量。

密度基求解器从原来的耦合求解器发展来的，同时求解连续性方程、动量方程、能量方程和组分方程。然后依次再求解标量方程（注意，密度基求解器不求解压力修正方程，因为其压力是由状态方程得出的）。密度基求解器收敛速度快，需要内存和计算量比压力基求解器要大。

3.3.2 FLUENT 6.3 计算模式的选择

传统 FLUENT 软件提供了 3 种计算模式：分离方式（非耦合式）、耦合隐式和耦合显式。这 3 种计算方式都可以给出精确的计算结果，只是针对某些特殊问题时，不同的计算方式具有不同的运算特点。

分离计算和耦合计算的区别在于求解连续、动量、能量和组元方程的方法有所不同。分离方式是分别求解上面的几个方程，最后得到全部方程的解，耦合方式则是用求解方程组的方式，同时进行计算并最后获得方程的解。两种计算方式的共同点是，在求解附带的标量方程时，如计算湍流模型或辐射换热时，都是采用单独求解的方式，就是先求解控制方程，再求解湍流模型方程或辐射方程。区别在于：分离方式一般用于不可压缩或低马赫数压缩性流体的流动计算。耦合方式则通常用于高速可压流计算。而在 FLUENT 软件中，两种方式都可以用于可压和不可压流动计算，只是在计算高速可压流时，耦合方式的计算结果更好一些。

FLUENT 软件求解器的默认设置是分离算法，但是对于高速可压流、彻体力强耦合型问题（比如浮力问题或旋转流动问题）、超细网格计算问题等类型的问题，建议采用耦合隐式求解方法求解能量和动量方程，可较快地得到收敛解。缺点是需要的内存比较大（是非耦合求解迭代时间的 1.5~2.0 倍）。如果必须要耦合求解，但机器内存不够时，可以考虑用耦合显式求解器求解问题。该求解器也耦合了动量、能量及组分方程，但内存却比隐式求解方法小，缺点是计算时间比较长。

FLUENT 6.3 的计算模式可以通过 Solver（求解器）面板，选择压力基或密度基、隐式或显式、定常或非定常等基本模型。Solver 面板的启动方法为 Define→Models→Solver…，如图 3-31 所示。

在默认设置下，系统选用的是分离求解器。要选择压力基隐式算法，可在 Solver 选项组下选择 Pressure Based（压力基），在 Formulation（算法）选项组下选择 Implicit（隐式）。如要选择密度基显式方式，则在 Solver 选项组下选择 Density Based（密度基），在 Formulation 选项组下选择 Explicit（显式）。

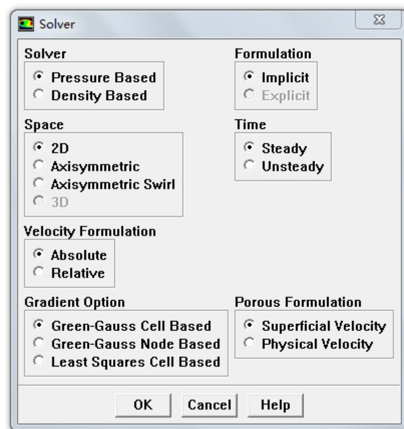


图 3-31　Solver 面板

3.3.3 FLUENT 6.3 运行环境的选择

1．参考压力的选择

在 FLUENT 6.3 中，压力（包括总压和静压）都是相对压力值（Gauge Pressure），即相对于运行参考压力（Operating Pressure）而言的。当需要绝对压力时，FLUENT 6.3 会把相对压力与参考压力相加后输出给用户。



执行 Define→Operating Conditions 命令，弹出 Operating Conditions 对话框，如图 3-32 所示。可以根据需要设定参考压力的大小，若不做任何设置，则默认为标准大气压。

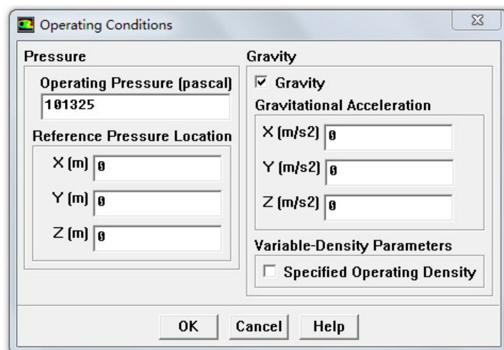


图 3-32　Operating Conditions 对话框

对于不可压流动，若边界条件中不包括有压力边界条件时，用户应该设置一个参考压力的位置。在计算中，FLUENT 6.3 会强制这一点的压力为 0，若不做任何指定，则默认（0，0，0）点。

2．重力选项

如果所计算的问题涉及重力的影响，则需要选择 Operating Conditions 对话框中的 Gravity 复选框。同时在 X、Y、Z 3 个方向上指定重力加速度的分量值。在默认情况下，FLUENT 6.3 是不计重力影响的。

3.3.4　FLUENT 6.3 的基本物理模型

1．连续性和动量方程

对于所有的流动，FLUENT 6.3 都是解质量和动量守恒方程。对于包括热传导或可压性的流动，需要解能量守恒的附加方程。对于包括组分混合和反应的流动，需要解组分守恒方程或者使用 PDF 模型来解混合分数的守恒方程以及其方差。当流动是湍流时，还要解附加的输运方程。

（1）质量守恒方程　质量守恒方程又称为连续性方程，即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\right)=S_m \tag{3-1}$$

该方程是质量守恒方程的一般形式，它适用于可压流动和不可压流动。源项S_{m}是从分散的二级相中加入到连续相的质量（比如由于液滴的蒸发），源项也可以是任何的自定义源项。

二维轴对称问题的连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v)\frac{\rho v}{r}=S_m \tag{3-2}$$

具体各个变量的意义可以参阅相关的流体力学书籍。

（2）动量守恒方程　在惯性（非加速）坐标系中 i 方向上的动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho u_i\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i \tag{3-3}$$

1 P1
2 P16
第 3 章 FLUENT 6.3 的使用
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

式中，p是静压；τ_{ij}是应力张量；g_i和F_i分别为i方向上的重力体积力和外部体积力（如离散相相互作用产生的升力）。F_i包含了其他的模型相关源项，如多孔介质和自定义源项。

应力张量τ_{ij}为

$$\tau_{ij}=\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij} \quad (3\text{-}4)$$

对于二维轴对称几何外形，轴向和径向的动量守恒方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho uu)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho vu)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(2\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{2}{3}(\nabla\cdot\vec{v})\right)\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]+F_x \quad (3\text{-}5)$$

以及

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho uv)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho vv)=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial r}\right)\right]+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{2}{3}(\nabla\cdot\vec{v})\right)\right]-2\mu\frac{v}{r^2}+\frac{2}{3}\frac{\mu}{r}(\nabla\cdot\vec{v})+\rho\frac{w^2}{r}+F_r \quad (3\text{-}6)$$

其中

$$\nabla\cdot\vec{v}=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial r}+\frac{v}{r}$$

w是漩涡速度（具体可以参阅模拟轴对称涡流中漩涡和旋转流动的信息）。

2．热传导

FLUENT 6.3 允许在模型的流体和/或固体区域包含热传导。FLUENT 6.3 可以预测周期性几何外形的热传导，如密集的热交换器，它只需要考虑单个的周期性模块进行分析。关于这样流动的处理，需要使用周期性边界条件。

热传导问题的设定步骤如下：

（1）激活热传导的计算　执行 Define→Models→Energy...命令，在能量面板中打开激活能量方程选项，如图 3-33 所示。

（2）如果是模拟粘性流动，而且希望在能量方程中包括粘性热传导项，则在粘性模型面板中打开粘性热传导项。执行 Define→Models→Viscous...命令。

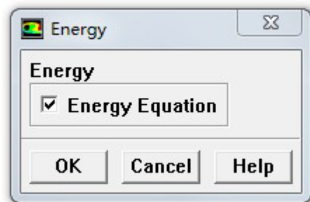


图 3-33　能量面板中的能量方程选项

（3）在流动入口、出口和壁面处定义热边界条件　执行 Define→Boundary Conditions...命令，在流动的出入口设定温度，在壁面处可设定下面的某一热条件。

- 指定热流量。
- 指定温度。
- 对流热传导。
- 外部辐射。
- 外部辐射和外部对流热传导的结合。

入口处默认的热边界条件为指定的温度 300 K（0℃=273.15K）；壁面处默认的条件为零



热流量（绝热）。

（4）定义适合于热传导的材料属性　执行 Define→Materials...命令。

1）温度的上下限。出于稳定性考虑，FLUENT 6.3 包括了预测温度范围的限制。设定温度上下限的目的是为了提高计算的稳定性，从物理意义上说，温度应该处于已知极限的范围之内。有时候方程中间解会导致温度超出极限，这时就不利于定义属性。温度极限保证问题的温度在估计的范围之内。如果计算的温度超出最大极限，那么所存储的温度就会固定在最大值处。默认的温度上限是 5000 K。如果计算的温度低于最小极限，那么存储的温度就会固定在最小值处。默认的温度下限是 1 K。

如果所预期的温度超过 5000K，则应该使用解限制面板来增加最大温度。执行 Solve→Controls→Limits...命令。

2）热传导的报告。FLUENT 6.3 为热传导模拟提供了附加的报告选项。可以生成图形或者报告下面的变量或函数：静温、总温、焓、相对总温、壁面温度（内部表面）、壁面温度（外部表面）、总焓、总焓误差、熵、总能量、内能、表面热流量、表面热传导系数、表面努塞尔（Nusselt）数、表面斯坦顿（Stanton）数。

3．浮力驱动流动和自然对流

当加热流体，而且流体密度随温度变化时，流体会由于重力的原因而导致密度的变化。这种流动现象被称为自然对流（或者混合对流），FLUENT 6.3 可以模拟这种流动。

可以用 Grashof 数雷诺数的比值来度量浮力在混合对流中的作用，即

$$\frac{\mathrm{Gr}}{Re^2}=\frac{\Delta\rho g h}{\rho v^2} \tag{3-7}$$

当这个数接近或者超过 1，就应该考虑浮力对于流动的贡献。反之，就可以忽略浮力的影响。在纯粹的自然对流中，浮力诱导流动由瑞利数（Rayleigh）度量，即

$$\mathrm{Ra}=g\beta\Delta T L^3\rho/\mu\alpha \tag{3-8}$$

其中，热膨胀系数为

$$\beta=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial T}$$

热扩散系数为

$$\alpha=\frac{k}{\rho c_p}$$

瑞利数小于 10^{-8}表示浮力诱导为层流流动，当瑞利数在 10^{-10}～10^{-8}之间就开始过渡到湍流了。

在混合或自然对流中，必须提供下面的输入来考虑浮力问题。

（1）在能量面板中打开能量方程选项　菜单为 Define→Models→Energy...。

（2）执行 Define→Operating Conditions 命令，在如图 3-34 所示的操作条件（Operating Conditions）面板中选择重力选项，并在每一个方向上输入相应的重力加速度数值。


注意

FLUENT 6.3 中默认的重力加速度为 0。

（3）如果使用不可压理想气体定律，则要在操作条件面板中检查操作压力的数值（非零值）。

4．多相流模型

FLUENT 6.3 提供了 3 种多相流模型包括 VOF（Volume of Fluid）模型、Mixture（混合）模型和 Eulerian（欧拉）模型。选择 Define→Models→Multiphase 命令，弹出 Multiphase Model 对话框，如图 3-35 所示。在默认状态下，Multiphase Model 对话框的 OFF 单选按钮处于选中状态。

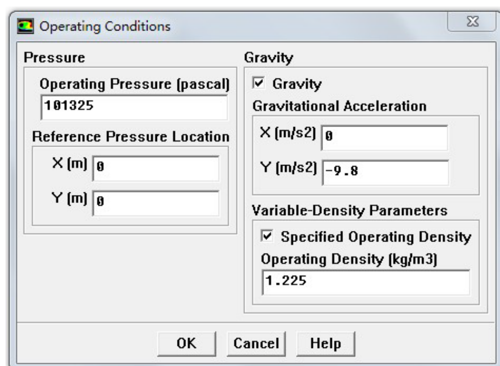


图 3-34　Operating Conditions 面板

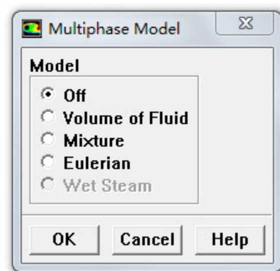


图 3-35　Multiphase Model 对话框

（1）VOF 模型　该模型通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的容积比来模拟 2 种或 3 种不能混合的流体，如图 3-36 所示。典型的应用包括流体喷射、流体中气泡运动、流体在大坝坝口的流动、气液界面的稳态和瞬态处理等。

（2）Mixture 模型　该模型用于模拟各相有不同速度的多相流，但是假定了在短空间尺度上局部的平衡。典型的应用包括沉降、气旋分离器、低载荷作用下的多粒子流动、气相容积率很低的泡状流。

（3）Eulerian 模型　该模型可模拟多相分流及相互作用的相，与离散相模型中 Eulerian-Lagrangian 方案只用于离散相不同，在多相流模型中 Eulerian 可用于模型中的每一相。

5．粘性模型

FLUENT 6.3 提供了 7 种粘性模型包括无粘、层流、Spalart-Allmaras 单方程、k-ε 双方程模型、k-ω 双方程、Reynolds 应力和大涡模拟模型，其中大涡模拟模型只对三维问题有效。选择 Define→Models→Viscous 命令，弹出 Viscous Model 对话框，如图 3-37 所示。

Inviscid 模型：进行无粘流计算。

Laminar 模型：层流模拟。

Spalart-Allmaras[1 eqn]：用于求解动力涡粘输运方程，不必要去计算和局部剪切层厚度相关的长度尺度。

k-epsilon（2 eqn）模型：该模型又分为标准 k-ε 模型、RNG k-ε 模型和 Realizable k-ε 模型 3 种。

k-omega（2 eqn）模型：使用 k-ω 双方程模型进行湍流计算，它分为标准 k-ω 模型和 SST k-ω 模型。标准 k-ω 模型主要应用于壁面约束流动和自由剪切流动。SST k-ω 模型在近壁面区有更好的精度和算法稳定性。



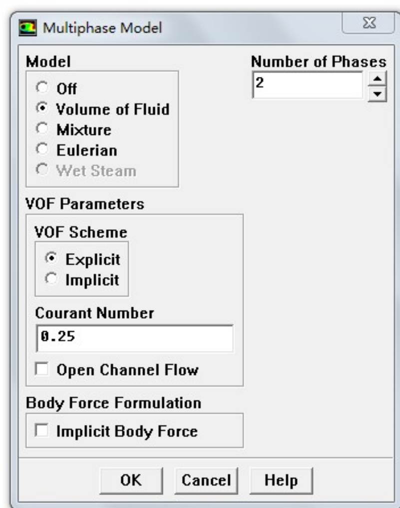


图 3-36　VOF 模型

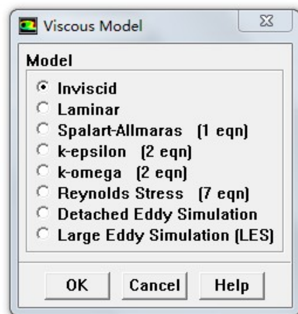


图 3-37　Viscous Model 对话框

Reynolds Stress（7 eqn）模型：该模型是最精细制作的湍流模型，可用于飓风流动、燃烧室高速旋转流、管道中二次流等。

Detached-Eddy Simulation 模型：脱体涡模拟（DES）是近年来出现的一种结合雷诺平均方法和大涡数值模拟两者优点的湍流模拟方法，采用基于 Spalart-Allmaras 方程模型的 DES 方法，数值求解 Navier-Stokes 方程，模拟绕流发生分离后的旋涡运动。其中，空间区域离散采用有限体积法，方程空间项和时间项的数值离散分别采用 Jameson 中心格式和双时间步长推进方法。通过模拟圆柱绕流及翼型失速绕流，观察到了与物理现象一致的旋涡结构，得到与实验数据相吻合的计算结果。

Large Eddy Simulation（LES）模型：该模型只对三维问题有效。

6．辐射模型

选择 Define→Models→Radiation 命令，弹出 Radiation Model 对话框，如图 3-38 所示。辐射模型可用于火焰辐射传热、表面辐射传热、导热、对流与辐射的耦合问题、采暖、通风等。

7．组分模型

组分模型主要用于对化学组分的输运和燃烧等化学反应进行的模拟。选择 Define→Models→Species 命令，弹出 Species Model 对话框，如图 3-39 所示。

Species Transport 模型：通用有限速率模型。

Non-Premixed Combustion 模型：非预混和燃烧模型，主要用于模拟湍流扩散火焰设计。

Premixed Combustion 模型：预混和燃烧模型，主要用于完全预混合的燃烧系统。

Partially Premixed Combustion 模型：部分预混燃烧模型用于非预混燃烧和完全预混燃烧结合的系统。

Composition PDF Transport 模型：该模型可用于预混、非预混及部分预混火焰中。

8．离散相模型

用于预测连续相中由于湍流漩涡作用而对颗粒造成的影响，离散相的加热或冷却，液滴

的蒸发与沸腾、崩裂与合并，模拟煤粉燃烧等。选择 Define→Models→Discrete Phase 命令，弹出 Discrete Phase Model 对话框，如图 3-40 所示。

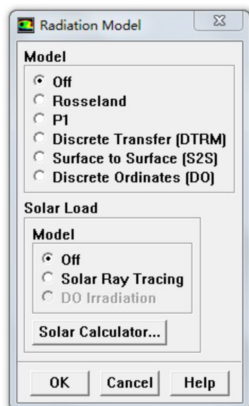


图 3-38　Radiation Model 对话框

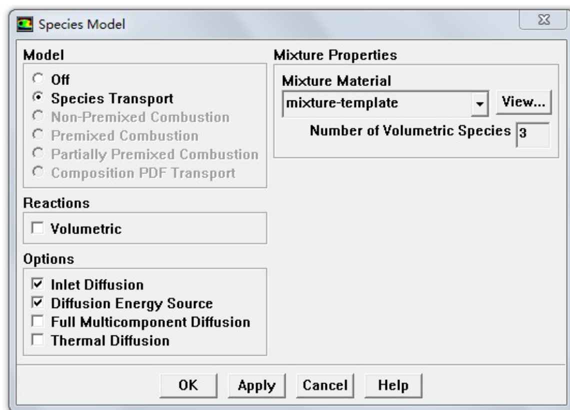


图 3-39　Species Model 对话框

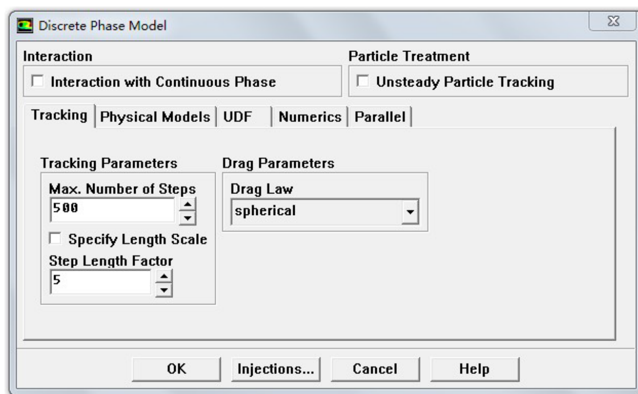


图 3-40　Discrete Phase Model 对话框

9．凝固和熔化

选择Define→Models→Solidification & Melting命令，弹出Solidification and Melting对话框，如图 3-41 所示。如果要进行凝固和熔化的计算，则需要选择Solidification/Melting复选框，给出Mushy Zone Constant值，一般在 10^4~10^7之间。

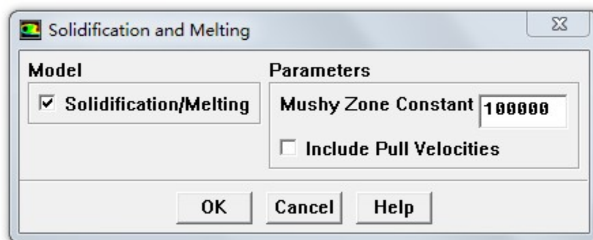


图 3-41　Solidification and Melting 对话框



3.3.5　FLUENT 6.3 的材料定义

执行Define→Materials命令，在Materials对话框中定义流动的材料，如图 3-42 所示。FLUENT 6.3 默认的材料为空气（Air），倘若在问题中需要用到其他材料，比如水，就需要从FLUENT 6.3 自带的材料数据库中调用。具体操作方法为：单击Materials对话框右侧的Fluent Database…按钮，弹出Fluent Database Materials对话框，从下拉列表框中选择所需的材料——水，即单击water-liquid[h2o<1>]，则会在下方的Properties中出现相应的物理属性数据，如密度为 998.2kg/m^3，比热容为 4182j/(kg·K)等，如图 3-43 所示。单击Copy按钮，将数据库中的材料复制到当前工程中。然后在Materials对话框中的Fluent Fluid Materials的下拉列表框中就出现了空气和水两种材料。最后，顺序单击Change/Create和Close按钮，完成材料的定义。

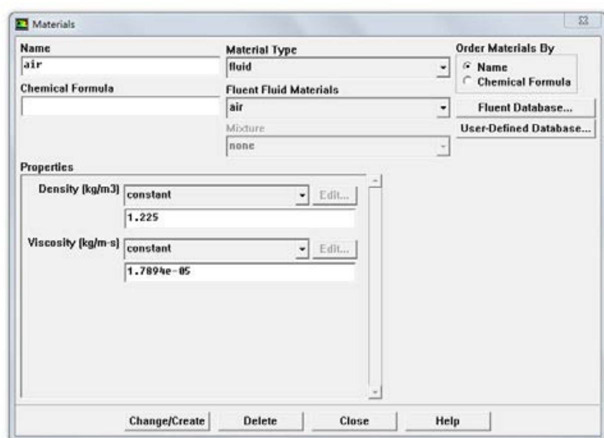


图 3-42　Materials 对话框

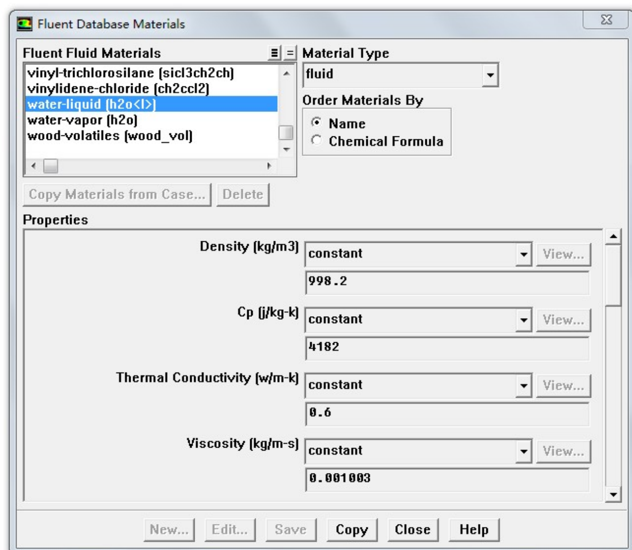


图 3-43　Fluent Database Materials 对话框

1 P1
2 P16
第 3 章 FLUENT 6.3 的使用
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

3.4 设置 FLUENT 6.3 的边界条件

边界条件包括流动变量和热变量在边界处的值。它是 FLUENT 6.3 分析得很关键的一部分，设定边界条件必须小心谨慎。

边界条件的分类包括进出口边界条件：压力、速度、质量进口、进风口、进气扇、压力出口、压力远场边界条件、质量出口、通风口、排气扇；壁面、Repeating and Pole Boundaries；壁面、对称、周期、轴；内部单元区域：流体、固体（多孔是一种流动区域类型）；内部表面边界：风扇、散热器、多孔跳跃、壁面、内部。内部表面边界条件定义在单元表面，这意味着它们没有有限厚度，并提供了流场性质的每一步的变化。这些边界条件用来补充描述排气扇、细孔薄膜以及散热器的物理模型。内部表面区域的内部类型不需要输入任何东西。

本节将详细介绍边界条件，并详细介绍它们的设定方法以及设定的具体合适条件。

1．使用边界条件面板

边界条件对于特定边界允许改变边界条件区域类型，并且打开其他的面板以设定每一区域的边界条件参数

单击菜单 Define→Boundary Conditions…，弹出如图 3-44 所示的 Boundary Conditions 对话框。

2．改变边界区域类型

在设定任何边界条件之前，必须检查所有边界区域的区域类型，如有必要就作适当的修改。例如，如果网格是压力入口，但是想要使用速度入口，就要把压力入口改为速度入口之后再设定。

改变类型的步骤如下：

（1）在区域列表框中选定所要修改的区域，如图 3-45a 所示。

（2）在类型列表框中选择正确的区域类型。

（3）当问题提示菜单出现时，单击 Yes 按钮，如图 3-45b 所示。

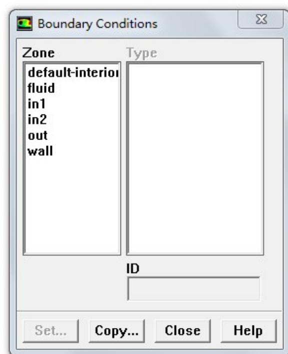
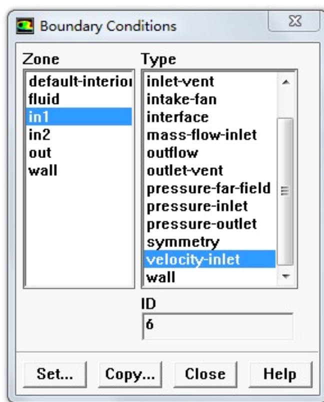
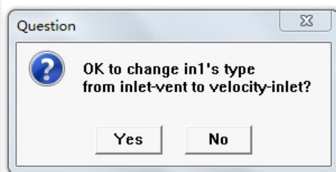


图 3-44 Boundary Conditions 对话框



a)



b)

图 3-45 改变边界区域类型

确认改变之后，区域类型将会改变，名字也将自动改变，设定区域边界条件的面板也将自动打开。区域类型的分类如表 3−2 所示。


注意

这个方法不能用于改变周期性类型，因为该边界类型已经存在了附加限制。需要注意的是，只能在图 3−45a 每一个类别中改变边界类型（注意：双边区域表面是分离的不同单元区域）。

表 3−2　区域类型的分类列表

Category	Zone Types
Faces	Axis、outflow、mass flow inlet、pressure far field、pressure inlet、pressure outlet、symmetry、velocity inlet、wall、inlet vent、intake fan、outlet vent、exhaust fan
Double-Sided Faces	Fan、interior、porous jump、radiator、wall
Periodic	Periodic
Cells	Fluid、solid(Porous is a type of fluid cell)

3．设定边界条件

在 FLUENT 6.3 中，边界条件和区域有关，而与个别表面或者单元无关。设定每一特定区域的边界条件，需要遵循下面的步骤：

（1）在边界条件区域的列表框中选择区域，单击 Set 按钮；或者在区域列表框中选择区域。

（2）在类型列表框中单击所要选择的类型，或者在区域列表框中双击所需区域，选择边界条件区域将会打开，并且可以指定适当的边界条件。

（3）在图像显示方面选择边界区域　在边界条件中都能用鼠标在图形窗口选择适当的区域。如果是第一次设定问题，这一功能尤其有用，如果有两个或者更多的具有相同类型的区域，并且想要确定区域的标号（也就是画出哪一区域是哪个）这一功能也很有用。

要使用该功能应按下述步骤进行：

（1）用网格显示面板显示网格。

（2）用鼠标指针（默认是鼠标右键——参阅控制鼠标键函数以改变鼠标键的功能）在图形窗口中单击边界区域。在图形显示中选择的区域将会自动被选入边界条件面板中的区域列表，它的名字和编号也会自动在控制窗口中显示。

1）改变边界条件名字。每一边界的名字是它的类型加标号数，如 pressure−inlet−7。在某些情况下，可能想要对边界区域分配更多的描述名。重命名区域应遵循如下步骤：① 在边界条件的区域列表框中选择所要重命名的区域。② 单击 Set...按钮打开所选区域的面板。③ 在区域名字中输入新的名字。④ 单击 OK 按钮。


注意

如果先指定区域新名字然后改变它的类型，则所改的名字将会被保留；如果区域名字是类型加标号，则名字将会自动改变。

2）边界条件的非一致输入。每一类型的边界区域的大多数条件被定义为轮廓函数而不是常值。可以使用外部产生的边界轮廓文件的轮廓，或者用自定义函数（UDF）来创建。

1 P1
2 P16
第 3 章 FLUENT 6.3 的使用
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

具体情况参阅第 6 章 UDF 的使用。

4．流动入口和出口

（1）使用流动边界条件　对于流动的出入口，FLUENT 6.3 提供了 10 种边界单元类型包括压力入口、速度入口、质量流动入口、压力出口、压力远场、质量出口、进气口、进气扇、出气口以及排气扇。

1）压力入口边界条件。压力入口边界条件用于定义流动入口的压力以及其他标量属性。它即可以用于可压流，也可以用于不可压流。压力入口边界条件可用于压力已知，但是流动速度和/或速率未知的情况。这一情况可用于很多实际问题，如浮力驱动的流动。压力入口边界条件也可用来定义外部或无约束流的自由边界。

① 压力入口边界条件的输入。压力入口边界条件需要输入：驻点总压、驻点总温、流动方向、静压、湍流参数（对于湍流计算）、辐射参数（对于使用 P−1 模型、DTRM 模型或者 DO 模型的计算）、化学组分质量百分比（对于组分计算）、混合分数和变化（对于 PDF 燃烧计算）、程序变量（对于预混合燃烧计算）、离散相边界条件（对于离散相的计算）、次要相的体积分数（对于多相计算）。

所有的值都在压力入口（Pressure Inlet）面板中输入，该面板是从边界条件打开的，如图 3−46 所示。

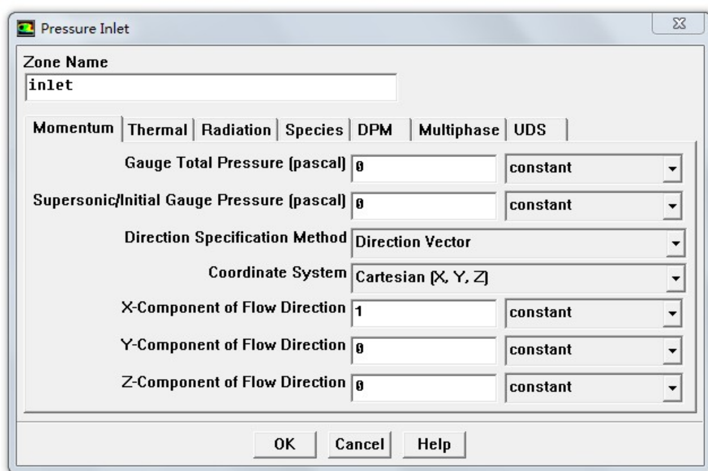


图 3−46　Pressure Inlet 面板

② 定义流动方向。可以在压力入口明确地定义流动的方向，或者定义流动垂直于边界。如果选择指定方向矢量，既可以设定笛卡儿坐标 *x*，*y* 和 *z* 的分量，也可以设（圆柱坐标的）半径、切线和轴向分量。对于使用分离求解器计算移动区域问题，流动方向将是绝对速度或者相对于网格相对速度，这取决于求解器面板中的绝对速度公式是否被激活。对于耦合求解器，流动方向通常是绝对坐标系中的。

定义流动方向的步骤如下：

a）在方向指定下拉菜单中选择指定流动方向的方法，或者是方向矢量或者是垂直于边界。

b）如果在第一步中选择垂直于边界，并且是在模拟轴对称涡流，则输入流动适当的切



向速度；如果不是模拟涡流就不需要其他的附加输入了。

c）如果第一步中选择指定方向矢量，并且几何外形是三维的，则需要选择定义矢量分量的坐标系统。在坐标系下拉菜单中选择笛卡儿（*x*，*y*，*z*）坐标，柱坐标（半径，切线和轴），或者局部柱坐标。

- 笛卡儿坐标系是基于几何图形所使用的。
- 柱坐标在下面的坐标系统的基础上使用轴、角度和切线 3 个分量。
- 当包含一个单独的单元区域时，坐标系由旋转轴和在流体面板中原来的指定来定义。
- 对于包含多重区域的问题（如多重参考坐标或滑动网格），坐标系由流体（固体）面板中为临近入口的流体（固体）区域的旋转轴来定义。

③ 定义湍流参数。

④ 定义辐射参数。

⑤ 定义组分质量百分比。

⑥ 定义 PDF/混合分数参数。

⑦ 定义预混合燃烧边界条件。

⑧ 定义离散相边界条件。

⑨ 定义多相边界条件。

⑩ 压力入口边界处的计算程序。FLUENT 6.3 压力入口边界条件的处理可以描述为从驻点条件到入口条件的非自由化的过渡。对于不可压流动是通过入口边界贝努力方程的应用来完成的。对于可压流动，使用的是理想气体的各向同性流动关系式。

⑪ 压力入口边界处的不可压流动计算。当流动进入压力入口边界时，FLUENT 6.3 使用边界条件压力，该压力是作为入口平面p_0的总压输入的。在不可压流动中，入口总压、静压和速度之间关系为$p_0 = p_s+1/2\rho v^2$。通过在出口分配的速度大小和流动方向可以计算出速度的各个分量。入口质量流速以及动量、能量和组分的流量可以作为计算程序在速度入口边界的大纲用来计算流动。

对于不可压流动，入口平面的速度既可以是常数，也可以是温度或者质量分数的函数。其中，质量分数应输入作为入口条件的值。在通过压力出口流出的流动，用指定的总压作为静压来使用。对于不可压流动来说，总温和静温相等。

⑫ 压力入口边界的可压流动计算。对于可压流动，应用理想气体的各向同性关系可以在压力入口将总压、静压和速度联系起来。在入口处输入总压，在临近流体单元中输入静压，关系式如下：

$$\frac{p_0' + p_{0p}}{p_s' + p_{0p}} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right]^{\gamma/(\gamma-1)} \tag{3-9}$$

其中，马赫数定义为

$$M = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{\gamma R T_s}} \tag{3-10}$$

马赫数的定义就不详述了。需要注意的是，式（3−9）中出现了操作压力p_{0p}，这是因为边界条件的输入是和操作压力有关的压力。给定p'_0和p'_s式（3−9）就可以用于计算入口平面流体的速度范围。入口处的各个速度分量用方向矢量来计算。对于可压流动，入口平面的密



度由理想气体定律来计算，即

$$\rho = \left(p_s' + p_{0p}\right) / RT_s \tag{3-11}$$

其中，R 由压力入口边界条件定义的组分质量百分比来计算。入口静温和总温的关系为

$$\frac{T_0}{T_s} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \tag{3-12}$$

2）速度入口边界条件。速度入口边界条件用于定义流动入口边界的速度和标量。在这个边界条件中，流动总的驻点的属性不是固定的，所以无论什么时候提供流动速度描述，它们都会增加。

这一边界条件适用于不可压流动，如果用于可压流动则会导致非物理结果，这是因为它允许驻点条件浮动。应该注意不要让速度入口靠近固体妨碍物，否则会导致流动入口驻点属性具有太高的非一致性。

对于特定的例子，FLUENT 6.3 可能会使用速度入口在流动出口处定义流动速度（在这种情况下不使用标量输入）。在这种情况下，必须保证区域内的所有流动性。

速度入口边界条件需要输入：速度大小与方向或者速度分量、旋转速度（对于具有二维轴对称问题的涡流）、温度（用于能量计算）、Outflow Gauge Pressure（for calculations with the coupled solvers）、湍流参数（对于湍流计算）、辐射参数（对于 P-1 模型、DTRM 模型或者 DO 模型的计算）、化学组分质量百分数（对于组分计算）、混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）、发展变量（对于预混合燃烧计算）、离散相边界条件（对于离散相计算）、二级相的体积分数（对于多相流计算）。

这些数值都由速度入口（Velocity Inlet）面板中输入，该面板可以从 Define→Boundary Condition…中打开，如图 3-47 所示。

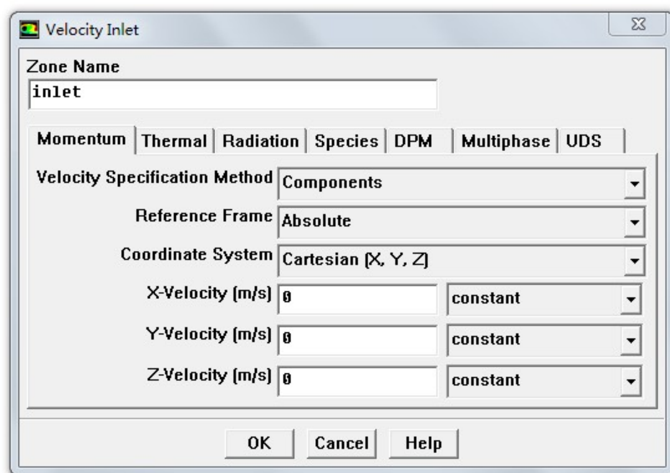


图 3-47　Velocity Inlet 面板

① 定义速度。可以通过定义来确定入口速度。如果临近速度入口的单元区域是移动的（也就是说使用旋转参考坐标系、多重坐标系或者滑动网格），也可以指定相对速度和绝对速度。对于 FLUENT 6.3 中的涡流轴对称问题，还要指定涡流速度。



定义流入速度的步骤如下：

a）选择指定流动方向的方法是在速度指定方法下拉菜单中选择速度大小和方向、速度分量或者垂直于边界的速度大小。

b）如果临近速度入口的单元区域是移动的，则可以指定相对或绝对速度。相对于临近单元区域或者参考坐标系下拉列表框的绝对速度。如果临近单元区域是固定的，相对速度和绝对速度是相等的，则不用查看下拉列表框。

c）如果想要设定速度的大小和方向或者速度分量，而且几何图形是三维的，则下一步就要选择定义矢量和速度分量的坐标系。坐标系就是前面所述的 3 种。

d）设定适当的速度参数。如果在定义速度的第一步中选择速度大小以及垂直的边界，则需要在流入边界处输入速度矢量的大小。如果模拟二维轴对称涡流，则要输入流向的切向分量。如果在定义速度的第一步中选择速度分量，则需要在流入边界中输入速度矢量的分量。

如果是二维非轴对称问题，或者在第三步中选择笛卡儿坐标系，需要定义流动 x，y 和（在三维问题中）z 3 个分量的大小。

如果是模拟涡流的二维轴对称问题，则需要在速度设定中设定轴向、径向和旋转速度。

如果是第三步中使用柱坐标系，则输入流动方向的径向、轴向和切向的 3 个分量值以及（可选）旋转角速度。

如果在第三步中选择当地柱坐标系，则输入流动方向的径向、轴向和切向的 3 个分量值，并指定轴向的 x，y 和 z 分量以及坐标轴起点的 x，y 和 z 坐标的值。

注意，速度的正负分量和坐标方向的正负是相同的。柱坐标系下的速度的正负也是一样。

如果在第一步中定义的是速度分量，并在模拟轴对称涡流，则可以指定除了涡流速度之外的入口涡流角速度 W。相似地，如果在第三步中使用柱坐标或者当地柱坐标系，则可以指定除切向速度之外的入口角速度 W。

如果指定W、v_q作为每个单元的$W\ r$，其中r是从起点到单元的距离。如果指定涡流速度和涡流角速度或者切向速度和角速度，则FLUENT 6.3 会将v_q和$W\ r$加起来获取每个单元的旋转速度或者切向速度。

② 定义温度。在解能量方程时，需要在温度场中的速度入口边界设定流动的静温。

③ 定义流出标准压力。如果是用一种耦合求解器，则可以为速度入口边界指定流出标准压力。如果流动要在任何表面边界处流出区域，则表面会被处理为压力出口，该压力出口为流出标准压力场中规定的压力。注意，这一影响和 RAMPANT 软件中得到的速度远场边界相似。

④ 定义湍流参数。

⑤ 定义辐射参数。

⑥ 定义组分质量百分比。

⑦ 定义 PDF/混合分数参数。

⑧ 定义预混合燃烧边界条件。

⑨ 定义离散相边界条件。

⑩ 定义多相边界条件。

⑪ 速度入口边界的计算程序。FLUENT 6.3 使用速度入口的边界条件输入计算流入流场

的质量流以及入口的动量、能量和组分流量。本节介绍了通过速度入口边界条件流入流场的算例以及通过速度入口边界条件流出流场的算例。

⑫ 流动入口的速度入口条件处理。使用速度入口边界条件定义流入物理区域的模型，FLUENT 6.3 既使用速度分量，也使用标量。这些标量定义为边界条件来计算入口质量流速、动量流量以及能量和化学组分的流量。

⑬ 邻近速度入口边界流体单元的质量流速由下式计算。

$$m=\int \rho \cdot vAd \tag{3-13}$$


注意

只有垂直于控制体表面的流动分量才对流入质量流速有贡献。

⑭ 流动出口的速度入口条件处理。有时速度入口边界条件用于流出物理区域的流动。例如，已知通过某一流域出口的流速，或者被强加在模型上，这时就需要用这种方法。


注意

这种方法在使用之前必须保证流域内的全部连续性。

在分离求解器中，当流动通过速度入口边界条件流出流场时，FLUENT 6.3 在边界条件中使用速度垂直于出口区域的速度分量。它不使用任何输入的其他的边界条件。除了垂直速度分量之外的所有流动条件，都被假定为逆流的单元。

在耦合求解器中，如果流动流出边界处的任何表面的区域，那一表面就会被看成压力出口，这一压力为 Outflow Gauge Pressure field 中所规定的压力。

⑮ 密度计算。入口平面的密度既可以是常数，也可以是温度、压力和/或组分质量百分数（在入口条件中输入的）的函数。

3）质量入口边界条件。该边界条件用于可压流动规定入口的质量流速。为了实现规定的质量流量中所需要的速度，所以要调节当地入口总压。这和压力入口边界条件是不同的，在压力入口边界条件中，规定的是流入驻点的属性，质量流量的变化依赖于内部解。

当匹配规定的质量和能量流速而不是匹配流入的总压时，通常就会使用质量入口边界条件。例如，一个小的冷却喷流流入主流场并和主流场混合，此时主流的流速主要是由（不同的）压力入口或出口边界条件对控制。

调节入口总压可能会导致节的收敛，所以如果压力入口边界条件和质量入口条件都可以接受，则应该选择压力入口边界条件。

在不可压流动中不必使用质量入口边界条件，因为密度是常数，速度入口边界条件就已经确定了质量流。

质量入口边界条件需要输入质量流速和质量流量、总温（驻点温度）、静压、流动方向、湍流参数（对于湍流计算）、辐射参数（对于 P−1 模型、DTRM 模型或者 DO 模型的计算）、化学组分质量百分数（对于组分计算）、混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）、发展变量（对于预混合燃烧计算）、离散相边界条件（对于离散相计算）。



这些数值都由质量流动入口（Mass-Flow Inlet）面板输入，该面板可以从 Define→Boundary Condition…中打开，如图 3-48 所示。

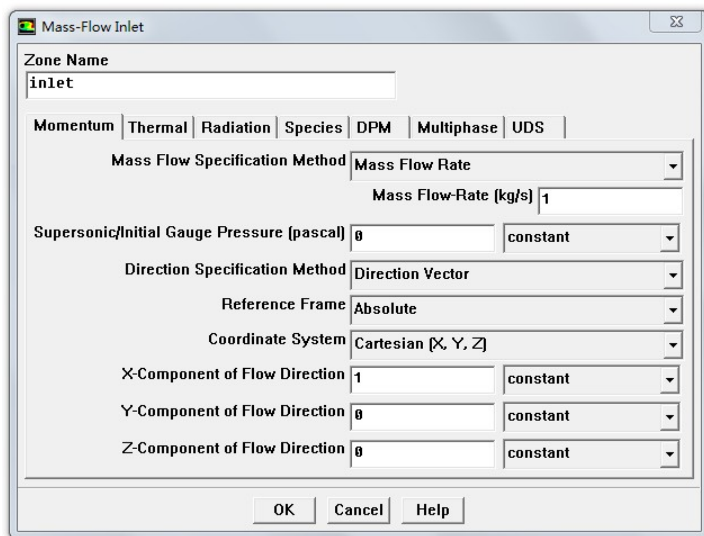


图 3-48 Mass-Flow Inlet 面板

① 定义质量流速度和流量。可以输入通过质量入口的质量流速，然后 FLUENT 6.3 将这个值转换为质量流量，或者直接指定质量流量。如果设定规定的质量流速，则将在内部转换为区域上规定的统一质量流量，这一区域由流速划分。也可以使用边界轮廓或者自定义函数来定义质量流量（不是质量流速）。

选择质量流速的方法包括质量流速或者质量流量，如果是质量流速（默认），则在质量流速框中输入规定的质量流速。



注意 对于轴对称问题，这一质量流速是通过完整区域（2p-radian），而不是 1-radian 部分的流速。

如果选择质量流量，则在 Mass Flux 框中输入质量流量。



注意 对于轴对称问题，这一质量流量是通过完整区域（2p-radian），而不是 1-radian 部分的流量。

② 定义总温。在质量流入口面板中的流入流体的总温框中输入总温（驻点温度）值。

③ 定义静压。如果入口流动是超声速的，或者打算用压力入口边界条件来对解进行初始化，那么必须指定静压（Termed the Supersonic/Initial Gauge Pressure）。

只要流动是亚声速的，FLUENT 6.3 会忽略 Supersonic/Initial Gauge Pressure，它是由指定的驻点值来计算的。如果打算使用压力入口边界条件来初始化解域，则 Supersonic/Initial Gauge Pressure 是与计算初始值的指定驻点压力相联系的，计算初始值的方法有各向同性关

1 P1
2 P16
第 3 章 FLUENT 6.3 的使用
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254



系式（对于可压流动）或者贝努力方程（对于不可压流动）。因此，对于亚声速入口，它是在关于入口马赫数（可压流动）或者入口速度（不可压流动）合理的估计之上设定的。

④ 定义流动方向。

⑤ 定义湍流参数。

⑥ 定义辐射参数。

⑦ 定义组分质量百分比。

⑧ 定义 PDF/混合分数参数。

⑨ 定义预混合燃烧边界条件

⑩ 定义离散相边界条件。

⑪ 质量流入口边界的计算程序。对入口区域使用质量入口边界条件，该区域的每一个表面的速度被计算出来，并且这一速度用于计算流入区域的相关解变量的流量。对于每一步迭代，调节计算速度以便于保证正确的质量流的数值。需要使用质量流速、流动方向、静压以及总温来计算这个速度。有两种指定质量流速的方法。第一种方法是指定入口的总质量流速 m(dot)。第二种方法是指定质量流量 rv（每个单位面积的质量流速）。如果指定总质量流速，则 FLUENT 6.3 会在内部将总流量除以垂直于流向区域的总入口面积得到统一质量流量，即

$$\rho v=\frac{\dot{m}}{A} \tag{3-14}$$

如果使用直接质量流量指定选项，则可以使用轮廓文件或者自定义函数来指定边界处的各种质量流量。一旦在给定表面的 $r\,v$ 值确定了，就必须确定表面的密度值 r，以找到垂直速度 v。密度获取的方法依赖于所模拟的是不是理想气体。

⑫ 理想气体的质量流边界的流动计算。如果是理想气体，则要用下式计算密度。

$$p=\rho RT \tag{3-15}$$

如果入口流动是超音速的，则使用的静压设为边界条件静压值。如果是亚音速静压，则从入口表面单元内部推导出来。入口的静温是从总焓推出的，总焓是从边界条件所设的总温推出的。入口的密度是从理想气体定律，使用静压和静温推导出来的。

⑬ 不可压流动的质量流边界的流动计算。如果是模拟非理想气体或者液体，则静温和总温相同。入口处的密度很容易从温度函数和（可选）组分质量百分比计算出来。速度可用质量入口边界的计算程序计算出来。

⑭ 质量流边界的流量计算。要计算所有变量在入口处的流量，流速 v 和方程中变量的入口值一起使用。例如，质量流量为 $r\ v$，湍流动能的流量为 $r\ k\ v$。这些流量用于边界条件来计算解过程的守恒方程。

4）压力出口边界条件。压力出口边界条件需要在出口边界处指定静压。静压值的指定只用于亚声速流动。如果当地流动变为超声速，则不再使用指定压力，此时压力要从内部流动中推导。所有其他的流动属性都从内部推导。

压力出口边界条件需要输入静压、回流条件、总温（驻点温度）、湍流参数（对于湍流计算）、化学组分质量百分数（对于组分计算）、混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）、发展变量（对于预混合燃烧计算）、二级相的体积分数（对于多相流计算）、辐射参数（对于



P-1 模型、DTRM 模型或者 DO 模型的计算）、离散相边界条件（对于离散相计算）。

这些数值都由压力出口（Pressure Outlet）面板输入，该面板可以从 Define→Boundary Condition…中打开，如图 3-49 所示。

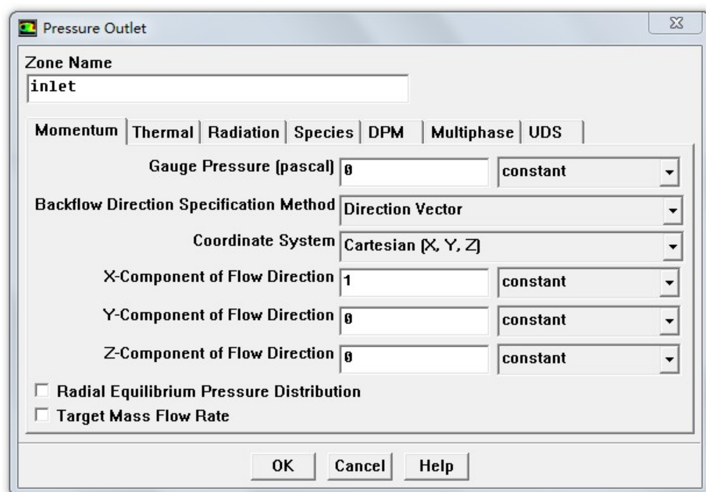


图 3-49　Pressure Outlet 面板

① 定义静压。如果在压力出口边界设定静压，则在压力出口面板设定适当的静压压力值。这一值只用于亚声速。如果当地流动变为超声速，则压力要从上游条件推导出来。

需要记住的是，这个静压和在操作条件面板中的操作压力是相关的。FLUENT 6.3 还提供了使用平衡出口边界条件的选项。要使这个选项激活，可打开辐射平衡压力分布。当这一功能被激活时，指定的静压压力只用于边界处的最小半径位置（相对于旋转轴）。其余边界的静压是从辐射速度可忽略不计的假定中计算出来的，压力梯度由下式计算出来。

$$\frac{\partial p}{\partial r} \equiv \frac{\rho v_\theta^2}{r} \tag{3-16}$$

式中，r是到旋转轴的距离；v_θ是切向速度。

即使旋转速度为零也可以使用这一边界条件。例如，它可以用于计算通过具有导流叶片的环面流动。



注意

辐射平衡出口条件只用于三维或者轴对称涡流计算。

② 定义回流条件。与所使用的模型一致的回流属性会出现在压力出口面板中。指定的值只用于通过出口进入的流动。

③ 定义辐射参数。

④ 定义离散相边界条件。

⑤ 压力出口边界的计算程序。

1 P1
2 P16
第 3 章 FLUENT 6.3 的使用
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254



在压力出口处，FLUENT 6.3 使用出口平面处的流体静压p_s作为边界条件的压力，其他所有的条件从区域内部推导出来。

5）压力远场边界条件。FLUENT 6.3 中使用的压力远场条件用于模拟无穷远处的自由流条件，其中自由流马赫数和静态条件被指定了。压力远场边界条件通常被称为典型边界条件，这是因为它使用典型的信息（黎曼不变量）来确定边界处的流动变量。

6）质量出口边界条件。在一个区域使用质量流进口边界条件时，区域的每一个面都会有一个对应的计算得到的速度，这个速度用于计算和结算有关的其他变量。在每一步迭代时，这一速度都要重新计算来维持正确的质量流数值。计算这一速度，要使用质量流量、流动方向、静压和滞止温度。有两种指定质量流量的方法：一是直接指定总流量m；二是指定质量通量ρv_n（单位面积质量流量）。两者之间的关系为

$$\rho v_n = m/A \tag{3-17}$$

如果给定质量流量，则可以计算ρv_n，但这时每个面积上的通量都是相等的；如果一个面积的ρv_n给定了，则必须确定ρ以计算垂直壁面的法向速度v_n。前者的确定方法如下。

在理想气体状态下，需要利用静止的温度和压力计算，公式为

$$P = \rho RT \tag{3-18}$$

如果气体是超音速流动的，则静压是一个边界条件。对于亚音速流动，静压由壁面处单元计算得到。静止温度由边界条件设置的总熵进行计算，公式为

$$H_0(T_0) = h(T) + 1/2v^2 \tag{3-19}$$

其中，速度由式（3−17）计算得到；温度可由式（3−18）计算得到，滞止温度由式（3−19）计算得到。

不可压缩流体：静止温度和滞止温度相等，密度是常量或者是温度和质量成分的函数。速度按式（3−17）计算。

7）进气口边界条件。进气口边界条件用于模拟具有指定的损失系数、流动方向以及周围（入口）环境总压和总温的进气口。

进气口边界需要输入总压（驻点压力）、总温（驻点温度）、流动方向、静压、湍流参数（对于湍流计算）、辐射参数（对于 P−1 模型、DTRM 模型或者 DO 模型的计算）、化学组分质量百分数（对于组分计算）、混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）、发展变量（对于预混合燃烧计算）、离散相边界条件（对于离散相计算）、二级相的体积分数（对于多相流计算）、损失系数。

这些数值都由进气口（Inlet Vent）面板输入，该面板可以从 Define→Boundary Condition…中打开，如图 3−50 所示。

前 11 项的设定和压力入口边界条件的设定一样。下面介绍损失系数的设定。

在 FLUENT 6.3 中的进气口模型中，进气口假定为无限薄，通过进气口的压降假定和流体的动压成比例，并以经验公式确定所应用的损失系数。也就是说，压降 Dp 和通过进气口速度的垂直分量的关系为

$$\Delta p = k_L \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{3-20}$$



式中，r是流体密度；k_L为无量纲的损失系数。

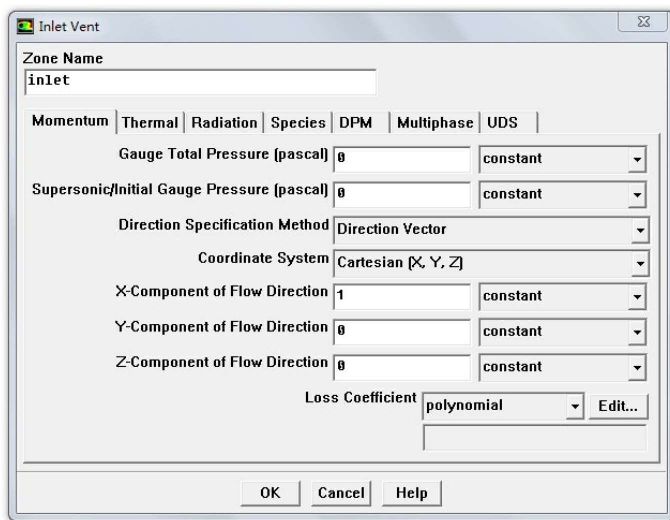


图 3-50　Inlet Vent 面板



注意

Dp 是流向压降，因此即使在回流中，进气口都会出现阻力。

可以定义通过进气口的损失系数为常量、多项式、分段线性函数或者垂向速度的分段多项式函数。

8）进气扇边界条件。进气扇边界条件用于模拟外部进气扇，它具有指定的压力跳跃、流动方向以及周围（进气口）总压和总温的外部进气扇流动。

进气扇边界需要输入总压（驻点压力）、总温（驻点温度）、流动方向、静压、湍流参数（对于湍流计算）、辐射参数（对于 P-1 模型、DTRM 模型或者 DO 模型的计算）、化学组分质量百分数（对于组分计算）、混合分数和变化（对于 PDE 燃烧计算）、发展变量（对于预混合燃烧计算）、离散相边界条件（对于离散相计算）、二级相的体积分数（对于多相流计算）、压力跳跃。

这些数值都由进气扇（Intake Fan）面板输入，该面板可以从 Define→Boundary Condition…中打开，如图 3-51 所示。

前 11 项的设定和压力入口边界条件的设定一样。

9）出气口边界条件。出气口边界条件用于模拟出气口，它具有指定的损失系数以及周围环境（排放处）的静压和静温。

10）排气扇边界条件。排气扇边界条件用于模拟外部排气扇，它具有指定的压力跳跃以及周围环境（排放处）的静压。

（2）决定湍流参数　在入口、出口或远场边界流入流域的流动，FLUENT 6.3 需要指定输运标量的值。本节描述了对于特定模型需要哪些量，并且该如何指定它们，也为确定流入边界值最为合适的方法提供了指导方针。

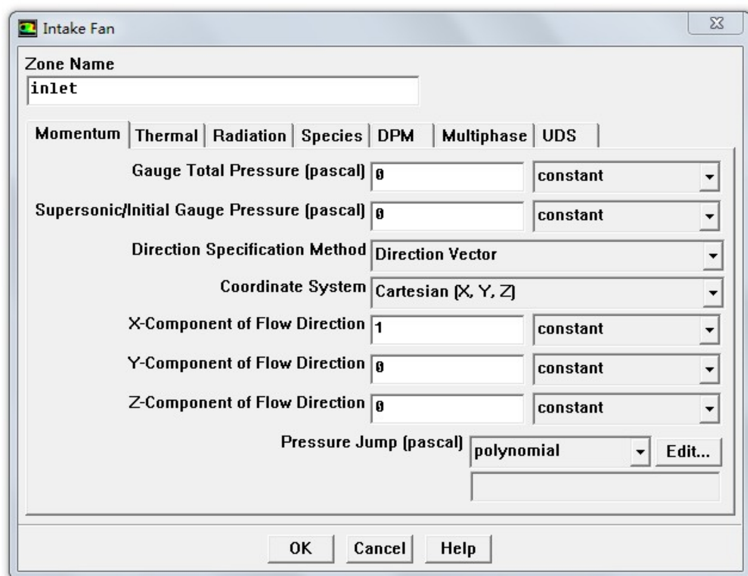


图 3-51　Intake Fan 面板

（3）使用轮廓指定湍流参量　在入口处要准确地描述边界层和完全发展的湍流流动，应该通过实验数据和经验公式创建边界轮廓文件来完美地设定湍流量。如果有轮廓的分析描述而不是数据点，也可以用这个分析描述来创建边界轮廓文件，或者创建用户自定义函数来提供入口边界的信息。一旦创建了轮廓函数，就可以使用如下的方法。

Spalart-Allmaras模型：在湍流指定方法下拉菜单中指定湍流粘性比，并在湍流粘性比之后的下拉菜单中选择适当的轮廓名。通过将$m_{t/m}$和密度与分子粘性适当结合，FLUENT 6.3 为修改后的湍流粘性计算边界值。

k-ε模型：在湍流指定方法下拉菜单中选择 K 和 Epsilon，并在湍流动能（Turb. Kinetic Energy）和湍流扩散速度（Turb. Dissipation Rate）之后的下拉菜单中选择适当的轮廓名。

雷诺应力模型：在湍流指定方法下拉菜单中选择雷诺应力部分，并在每一个单独的雷诺应力部分之后的下拉菜单中选择适当的轮廓名。

3.5　设置 FLUENT 6.3 的求解参数

1．设置离散格式与欠松弛因子

选择 Solve→Control→Solution 命令，弹出 Solution Controls 对话框，如图 3-52 所示。

其中各选项的功能如下。

- Equations：在求解过程中可单击某个方程，使其关闭。
- Under-Relaxation Factors：包含使用分离式求解器求解的所有方程的欠松弛因子。
- Discretization：用于设定相关方程的离散格式。
- Pressure-Velocity Coupling：选择压力与速度求解耦合的算法。

2．设置求解限制项

选择 Solve→Control→Limits 命令，弹出 Solution Limits 对话框，如图 3-53 所示。一般



来说，不需要改变默认值。

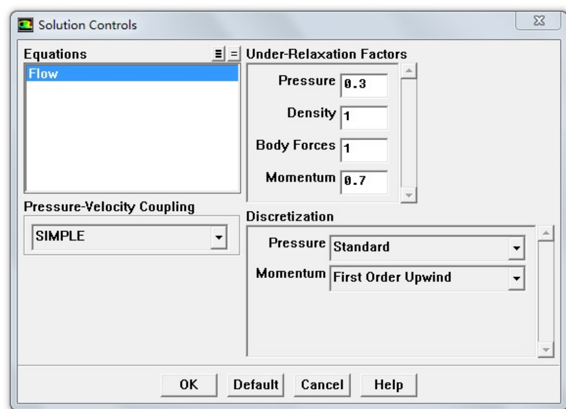


图 3-52　Solution Controls 对话框

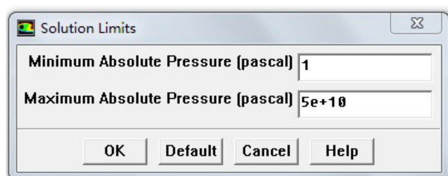


图 3-53　Solution Limits 对话框

3．监视参数的设置

选择 Solve→Monitors→Residual 命令，弹出 Residual Monitors 对话框，如图 3-54 所示。在这里可以改变变量的收敛精度。勾选 Plot 复选框即可绘制残差图。

4．流场初始化

选择 Solve→Initialize→Initialize 命令，弹出 Solution Initialization 对话框。在 Compute From 下拉列表框中选择特定区域的名称，就意味着要根据该区域的边界条件来计算初始值，然后在 Initial Values 选项组中手工输入初值，如图 3-55 所示。

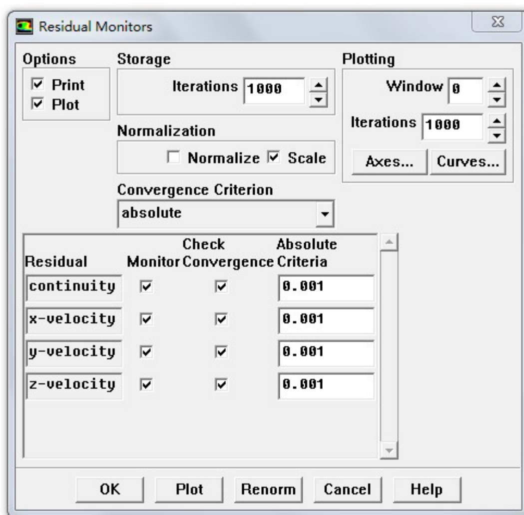


图 3-54　Residual Monitors 对话框

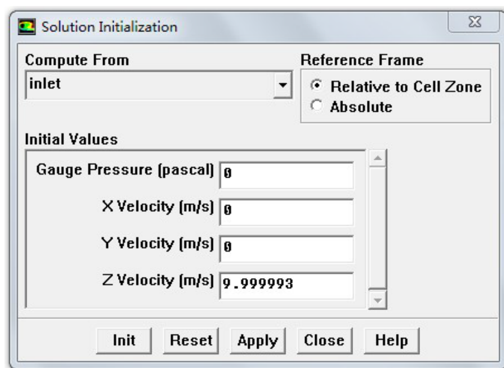


图 3-55　Solution Initialization 对话框



第 4 章　网格生成软件 GAMBIT

网格的生成是一个漫长又复杂的过程，经常需要经过大量的实验才能完成。因此，出现了许多商业化的专用网格生成软件，如 GAMBIT、TGrid、GeoMesh、preBFC 和 ICEMCFD 等。这些软件的使用方法大同小异，且各软件之间往往能够共享所生成的网格文件。

本章主要介绍 GAMBIT 软件的基本知识和使用步骤，包括建立几何模型、划分网格以及定义边界等操作，并通过实例分析帮助读者清晰地掌握 GAMBIT 的建模与生成网格，为导入 FLUENT 软件以及绘制复杂网格图形打下了基础。

4.1　GAMBIT 简介

GAMBIT 是功能强大且灵活方便的几何建模及网格划分工具，可以划分出含边界层等特殊要求的高质量网格。对于 Windows 操作系统，要运行 GAMBIT 软件，必须安装 Hummingbird.Exceed 软件来完成系统的虚拟。

4.1.1　GAMBIT 的功能及特点

GAMBIT 的功能主要包括两个方面。

- 构造几何模型：一般来说，只要模型不太复杂，都可以直接在 GAMBIT 中完成几何建模。对于一些复杂的 CFD 问题，特别是三维的 CFD 问题，就需要借助专用的 CAD 软件来完成建模。
- 划分网格和指定边界：GAMBIT 可以生成结构网格、非结构网格和混合网格等多种类型的网格，能对网格进行细分或粗化，生成不连续网格、可变网格和滑移网格。在网格生成之后，就可以在 GAMBIT 中指定边界。

其中，划分网格是其最主要的功能。它最终生成包含有边界信息的网格文件。

GAMBIT 软件具有以下特点：

- ACIS 内核基础上的全面三维几何建模能力，通过多种方式直接建立点、线、面、体，而且具有强大的布尔运算能力，ACIS 内核已提高为 ACIS R12。该功能大大领先于其他 CAE 软件的前处理器。
- 可对自动生成 Journal 文件进行编辑，以自动控制修改或生成新几何与网格。
- 可以导入 Pro/E、UG、CATIA、SolidWorks、ANSYS、PATRAN 等大多数 CAD/CAE 软件所建立的几何和网格。导入过程新增自动公差修补几何功能，以保证 GAMBIT 与 CAD 软件接口的稳定性和保真性，使得几何质量高，并大大减轻了工程



师的工作量。

- 新增 Pro/E、CATIA 等直接接口， 使得导入过程更加直接和方便。
- 强大的几何修正功能，在导入几何时会自动合并重合的点、线、面；新增几何修正工具条，在消除短边、缝合缺口、修补尖角、去除小面、去除单独辅助线和修补倒角时更加快速、自动、灵活，而且准确保证几何体的精度。
- G/Turbo 模块可以准确而高效地生成旋转机械中的各种风扇以及转子、定子等的几何模型和计算网格。
- 强大的网格划分能力，可以划分包括边界层等 CFD 特殊要求的高质量网格。GAMBIT 中专用的网格划分算法可以保证在复杂的几何区域内直接划分出高质量的四面体、六面体网格或混合网格。
- 先进的六面体核心（HEXCORE）技术是 GAMBIT 所独有的，集成了笛卡儿网格和非结构网格的优点，使用该技术划分网格时更加容易，而且大大节省网格数量、提高网格质量。
- 居于行业领先地位的尺寸函数（Size Function）功能可使用户能自主控制网格的生成过程以及在空间上的分布规律，使得网格的过渡与分布更加合理，最大限度地满足 CFD 分析的需要。
- GAMBIT 可高度智能化地选择网格划分方法，可对极其复杂的几何区域划分出与相邻区域网格连续的完全非结构化的混合网格。
- 新版本中增加了新的附面层网格生成器，可以方便地生成高质量的附面层网格。
- 可为 FLUENT、POLYFLOW、FIDAP、ANSYS 等求解器生成和导出所需要的网格和格式。

4.1.2　GAMBIT 的操作界面

GAMBIT 的操作界面可以分为菜单栏、视图窗口、命令显示窗口、命令输入窗口、命令解释窗口、操作面板和控制面板等，如图 4−1 所示。



图 4−1　GAMBIT 的操作界面



1．菜单栏

位于界面上方，包括 File、Edit、Solver 和 Help 4 个菜单。File 菜单提供的操作有新建文件、打开文件、保存、另存为、图形输出与打印、运行日志、清除日志、查看文件信息、导入、导出、连接 CAD、退出等。Edit 菜单提供的操作有编辑标题、编辑文件信息、设置参数、查找或修改默认的环境设置、撤销、恢复等。若需要改变背景色可以选择 Defaults 选项，在弹出的如图 4-2 所示的 Edit Defaults 对话框中选择 GRAPHICS 标签，再从下拉列表框中选择 WINDOWS BACKGROUND COLOR 选项，将 Value 信息框中默认的黑色背景改为 white，单击 Modify 按钮，即完成背景修改。同理，还可以对模型和网格的颜色参数进行相应的修改。

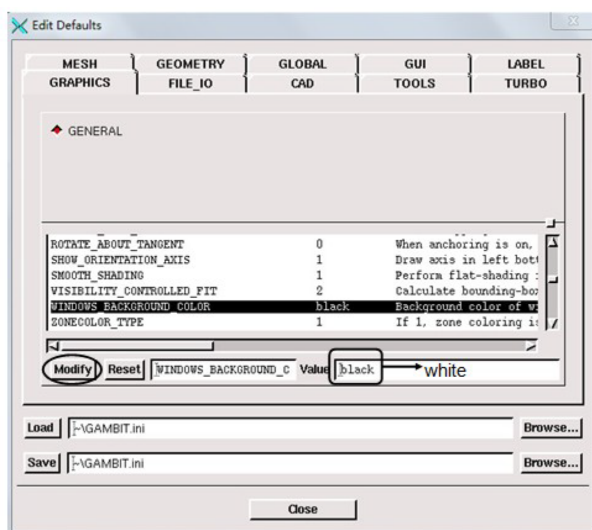


图 4-2　Edit Defaults 对话框

2．视图窗口

显示的 4 个视图窗口，移动十字光标可以实现各个窗口的缩放，如图 4-3 所示。

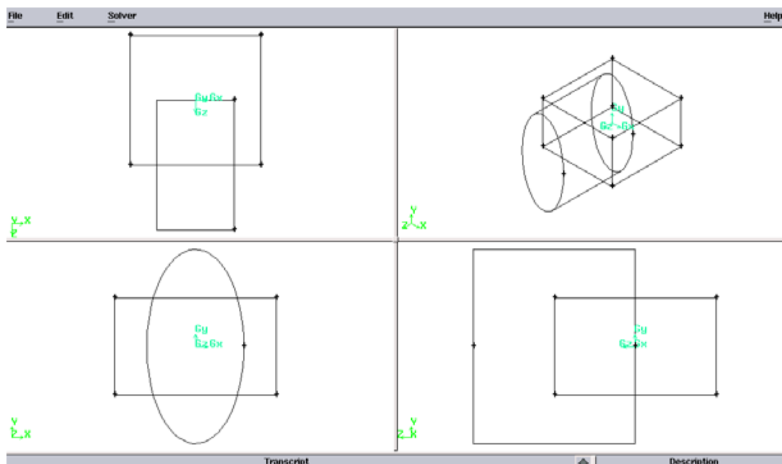


图 4-3　4 个视图窗口



3．命令显示窗口

命令显示窗口位于视图窗口的左下方，如图 4-4 所示。从该窗口可以看到每一步操作的命令及结果。

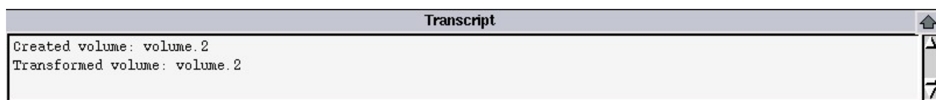


图 4-4　命令显示窗口

4．命令输入窗口

命令输入窗口如图 4-5 所示，位于命令显示窗口下方。在 Command 后的输入栏中可以输入相关命令，从而实现相应的操作。



图 4-5　命令输入窗口

5．命令解释窗口

命令解释窗口位于视图窗口右下角，将鼠标移至视图窗口右侧任意操作面板或视图控制面板按钮上，该窗口相应地会出现该按钮命令的解释，如图 4-6 所示。

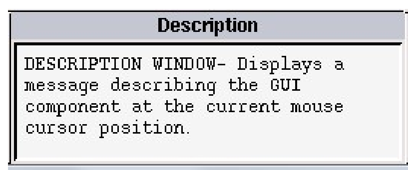


图 4-6　命令解释窗口

6．操作面板

操作面板位于界面右侧，由 3 个层次的命令组以及当前命令使用对话框组成。如图 4-7 所示，第一层为 Operation，包含 4 个二级命令组。

Geometry（几何模型绘制）：创建点、线、面和组。

Mesh（网格划分）：对边界、线、面、体和组的网格划分、网格连接和网格修改。

Zones（边界类型定义）：指定和命名模型机模型边界。

Tools（工具）：定义视图中的坐标系统。

7．控制面板

控制面板位于界面右下角，如图 4-8 所示。通过单击该区域内的按钮，可以对显示区内坐标系标示、颜色、模型的各个显示属性等进行控制。Active 一排的按钮用来控制视图显示，当激活相应的视图图标时，下方的 10 个按钮才会作用于该视图。

：将视图窗口中的图形缩放至全窗口显示。

：设置旋转图形时用的旋转轴心。

：选择不同的四视图或单视图显示。

：改变光源位置。

：撤销上一步操作。

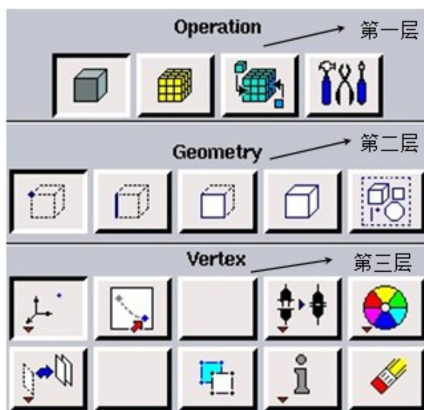


图 4-7　操作面板

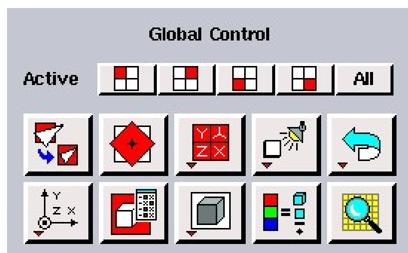


图 4-8　控制面板

：选择模型的方位坐标。

：指定模型是否可见。

：指定模型的外观显示。

：指定颜色模式。

：放大局部网络模型。

如果将 GAMBIT 中建立的网格模型调入 FLUENT 软件使用，则需要将其输出为.msh 文件(file/export)。

4.2　GAMBIT 的操作步骤

GAMBIT 生成网格文件通常有 3 步：建立几何模型、划分网格以及定义边界。下面对这 3 步进行详细的介绍。

4.2.1　建立几何模型

1．绘制点

执行 Geometry→Vertex→Create Vertex，弹出 Create Real Vertex 面板，如图 4-9 所示。在其中输入点的三维坐标，单击 Apply 按钮即可在视图窗口中生成相应的点。

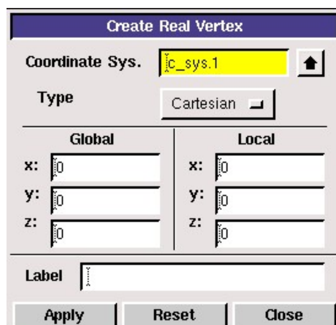


图 4-9　Create Real Vertex 面板



点的生成方式有 7 种，右击 Create Vertex 按钮，在其列表中可查看点的不同生成方式，如图 4-10 所示。

2．绘制线

执行 Geometry→Edge→Create Edge，弹出 Create Straight Edge 面板，在其中选取需要连接成直线的两点，单击 Apply 按钮就会在选择的两点之间建立一条直线。除了直线外，还有其他类型线的生成方式，右击 Create Edge 按钮，即弹出线的生成方式列表，如图 4-11 所示。

3．绘制面

执行 Geometry→Face→Form Face，弹出 Create Face From Wireframe 面板，选取需要围成面的线段，单击 Apply 按钮即生成面。右击 Form Face 按钮，弹出其他面的生成方式列表，如图 4-12 所示。

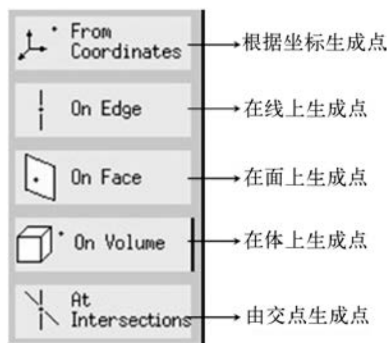


图 4-10　点的生成方式列表

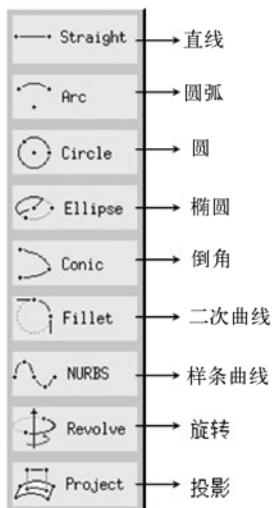


图 4-11　线的生成方式列表



图 4-12　面的生成方式列表

除了点→线→面或点→面的生成方法之外，还可以直接绘制面，单击 Create Face 按钮，弹出矩形生成面板，如图 4-13 所示。在宽、高输入栏中输入数值即可生成相应的矩形。右击 Create Face，弹出面的样式列表，还可以生成圆和椭圆，如图 4-14 所示。

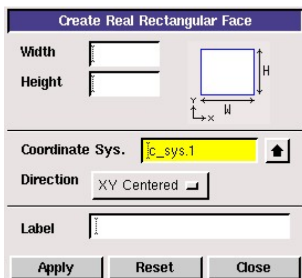


图 4-13　矩形生成面板

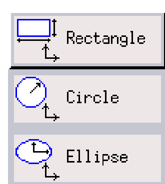


图 4-14　面的样式列表

4．绘制体

执行 Geometry →Volume →Form Volume ，在弹出的如图 4-15 所示的 Stitch Faces 面板中选取需要结合的面，单击 Apply 按钮，即生成体。右击 Form Volume 按钮，可弹出其他体的生成方式列表，如图 4-16 所示。

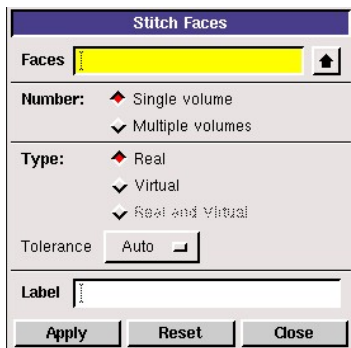


图 4-15　Stitch Faces 面板

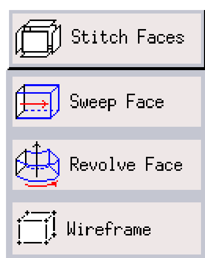


图 4-16　体的生成方式列表

如果想直接绘制体，可以单击 Create Volume 按钮，在弹出的如图 4-17 所示的六面体生成面板中输入长、宽、高，即生成对应的六面体。右击 Create Volume 按钮，可以弹出实体的样式列表，从其中选择圆柱体、棱柱体、棱锥体、台体、球体等，如图 4-18 所示。

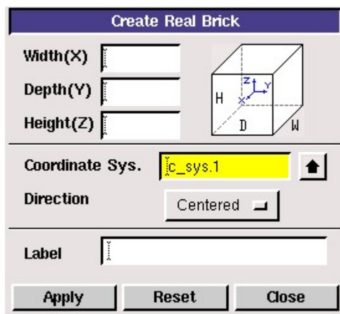


图 4-17　六面体生成面板



图 4-18　实体的样式列表

5．其他常用操作

除了基本的点、线、面、体建模操作命令外，还有一些常用的操作命令。例如，Move/Copy ：移动/复制命令，可以选取需要移动的或者复制的点、线、面、体，通过平移、旋转、映射等方法完成对目标模型的移动或复制。

Boolean Operation ：布尔运算，在面或体的建模过程中取并集、交集或者用一个面（一个体）减去另一个面（体）。

Split/Merge/Collapse Faces ：面切割、融合，将面缩成边。

Split/Merge Volumes ：体切割和融合。



Connect/Disconnect：把重合的点、线、面合并或解除合并连接状态。

Modify Color/Label：对点、线、面、体的色彩或标签进行自行配置。

Delete：删除错误或无用的模型。

4.2.2　划分网格

生成几何模型以后，接着要对网格进行划分。单击操作面板上的 Mesh 按钮，即可完成对网格的划分。具体的有对边界层网格的划分、线网格的划分、面网格的划分以及体网格的划分。

1．边界层网格的划分

由于流体具有粘性，精度要求较高时需要对计算网格进行特殊处理，即对边界网格进行划分。近壁面粘性效应明显以及流场参数变化梯度较大的区域都应该进行边界层网格划分。执行 Mesh→Boundary Layer 命令，弹出如图 4-19 所示的 Create Boundary Layer 面板，在 First row（第一个网格点距边界的距离）、Growth factor（网格的比例因子）、Rows（边界层网格点数）以及 Depth（边界层厚度）4 组参数中任意输入 3 组。Transition pattern 提供了 4 种不同的边界层划分形式（1:1、4:2、3:1 和 5:1）。

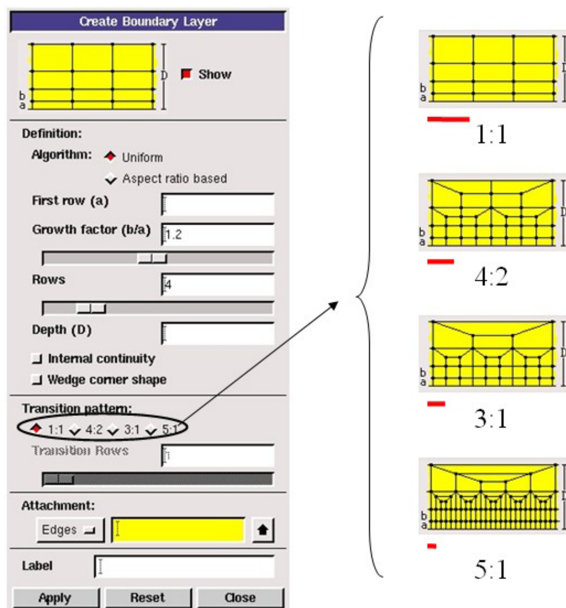


图 4-19　Create Boundary Layer 面板

2．线网格的划分

执行 Mesh→Edge→Mesh Edges 命令，弹出 Mesh Edges 面板，选择一条或多条需要划分的线段，在 Ratio 栏中输入比例因子，可以单调递增或单调递减，默认值为 1，即均匀分布。若同时选中 Double sided，则需要输入两个比例因子，划分出来的网格就会呈现中间密两端疏或者中间疏两端密的形式，如图 4-20 所示。在实际划分时，通常可给予尺寸（Interval size）或段数（Interval count）将线段分段。若需要在已经划分好的线段上重新划分网格，则需要将 Remove old mesh 选中，从而删除先前划分好的网格。

1 P1
2 P16
3 P34
第 4 章 网格生成软件 GAMBIT
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254



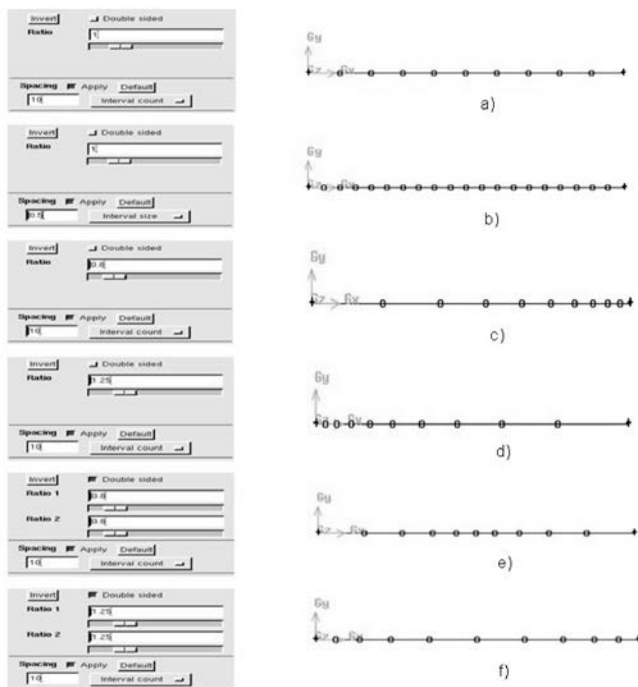


图 4−20　不同方法划分出的线网格

a) 比例因子为 1，按 10 段划分　b) 比例因子为 1，按 0.5m 尺寸划分　c) 比例因子为 0.8，按 10 段划分
d) 比例因子为 1.25，按 10 段划分　e) 双比例因子 0.8，按 10 段划分　f) 双比例因子为 1.25，按 10 段划分

3．面网格的划分

执行 Mesh→Face→Mesh Faces命令，弹出如图 4−21 所示的 Mesh Faces 面板，其中的 Elements 提供了 3 种面网格划分类型，Type 提供了 5 种网格划分的方法。在不同的 Elements 下，网格的划分方式是不同的，如表 4−1 所示。

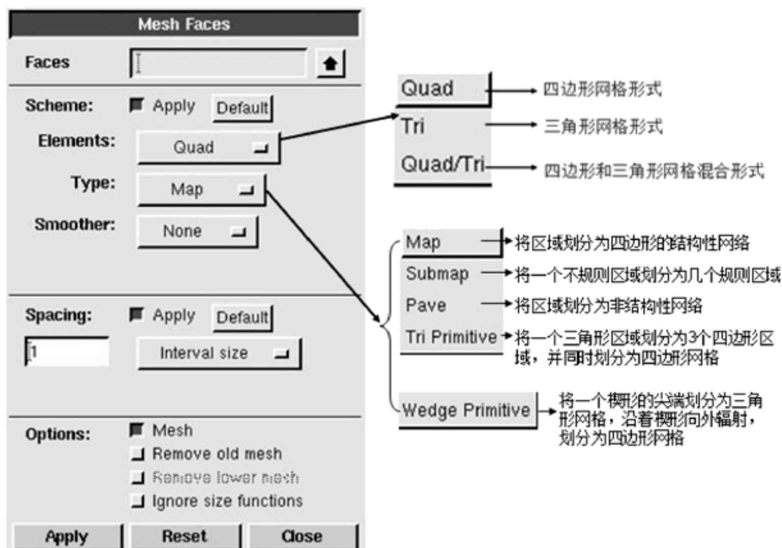


图 4−21　Mesh Faces 面板



表 4-1　不同网格类型下的面网格划分

类　　型	划 分 类 型				
Quad	Map	Submap	Pave		Tri Primitive
Tri			Pave		
Quad/Tri	Map	Pave		Wedge Primitive	

4．体网格的划分

与面网格的划分相似，执行 Mesh→Volume→Mesh Volumes命令，弹出如图 4-22 所示的 Mesh Volumes 面板，其中的 Elements 提供了 3 种体网格划分类型，Type 提供了 6 种网格划分的方法。在不同的 Elements 下，网格的划分方式是不同的，如表 4-2 所示。

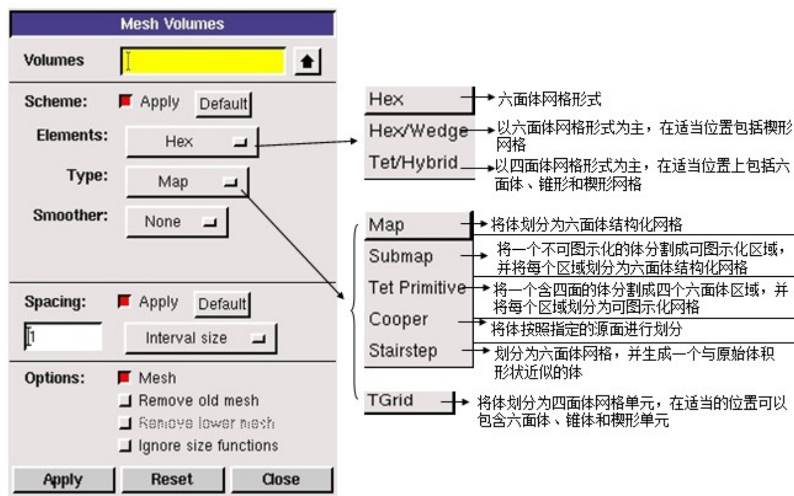


图 4-22　Mesh Volumes 面板

表 4-2　不同网格类型下的体网格划分

类　　型	划 分 类 型				
Hex	Map	Submap	Tet Primitive	Cooper	Stairstep
Hex/Wedge			Cooper		
Tet/Hybrid			TGrid		

4.2.3　定义边界

在完成建模和网格划分后，GAMBIT 还需要对模型进行边界定义。单击 Zones按钮，弹出的边界定义工具面板，其中有两个功能按钮：定义边界类型和定义介质类型，如图 4-23 所示。

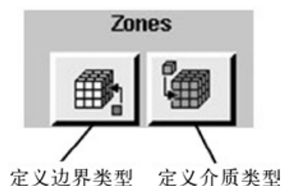


图 4-23　功能按钮

1．边界类型的定义

执行 Zones→Specify Boundary Types命令，弹出如图 4-24 所示的 Specify Boundary Types 面板，在 Type 中提供了 22 种流动进口、出口类型，

1 P1
2 P16
3 P34
第 4 章 网格生成软件 GAMBIT
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

如图 4-25 所示。可以选择需要定义边界类型的线、面或组进行定义。下面介绍几组常见的边界类型。

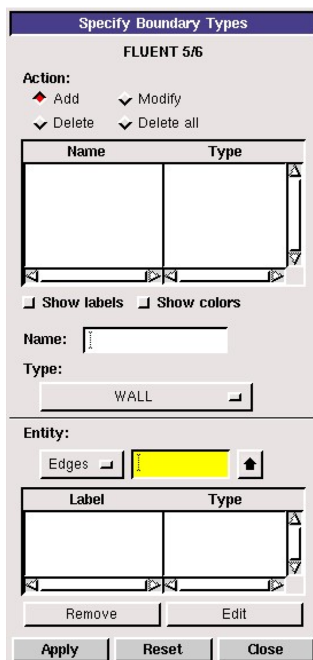


图 4-24　Specify Boundary Types 面板

WALL
AXIS
EXHAUST_FAN
FAN
INLET_VENT
INTAKE_FAN
INTERFACE
INTERIOR
INTERNAL
MASS_FLOW_INLET
OUTFLOW
OUTLET_VENT
PERIODIC
POROUS_JUMP
PRESSURE_FAR_FIELD
PRESSURE_INLET
PRESSURE_OUTLET
RADIATOR
RECIRCULATION_INLET
RECIRCULATION_OUTLET
SYMMETRY
VELOCITY_INLET

图 4-25　边界类型列表

- WALL：壁面边界，通常用于限制流体和固体区域，在 FLUENT 软件中可以用来定义为静止、运动、滑移或热边界。
- VELOCITY_INLET：速度入口边界，该类型定义后可在 FLUENT 软件中输入流动入口速度值和标量。
- MASS_FLOW_INLET：质量流动入口边界，该类型定义后可在 FLUENT 软件中输入具体的质量流速，通常适用于可压缩液体。
- PRESSURE_INLET：压力入口边界，该类型定义后可在 FLUENT 软件中输入入口边界的总压、静压等标量。
- OUTFLOW：出口流动边界，用于模拟未知出口速度或压力情况，假定除了压力之外的所有流动变量正法向梯度为 0，不可用于定义可压缩流动的边界。
- PRESSURE_OUTLET：压力出口边界，该类型定义后可在 FLUENT 软件中输入具体的出口静压值。当有回流时，使用压力出口边界代替 OUTFLOW 边界通常更容易得到收敛。
- SYMMETRY：对称边界，用于研究对象具有镜像特征的状况。
- AXIS：轴边界，必须使用在几何模型的中线处。
- INTAKE_FAN：进气扇边界，用来模拟外部进气扇。FLUENT 软件中需要给定压降、流动方向、周围环境的总压以及总温。
- EXHAUST_FAN：排气扇边界，用来模拟外部排风扇。FLUENT 软件中需要给定压



力跳跃以及周围环境的静压。

- INLET_VENT：进气口边界，用来模拟进气口。FLUENT 软件中需要给定损失系数、流动方向、周围环境的总压以及总温。
- OUTLET_VENT：排气口边界，用来模拟排气口。FLUENT 软件中需要给定损失系数、周围环境的静压和静温。

在 Specify Boundary Types 面板中的 Show labels Show colors 可以查询定义好的边界，避免错误定义和重复定义，从而提高定义边界的效率。

2．介质类型的定义

执行 Zones→Specify Continuum Types 命令，弹出 Specify Continuum Types 面板，如图 4-26 所示。对于固体和液体并存的模型，需要定义不同区域的介质类型。面板中的 Type 选项提供了固体（Solid）和流体（Fluid）两种类型。选择需要定义类型的面、体或组等区域，可以进行定义、添加、删除、修改、命名或者标示、显示色彩等操作。

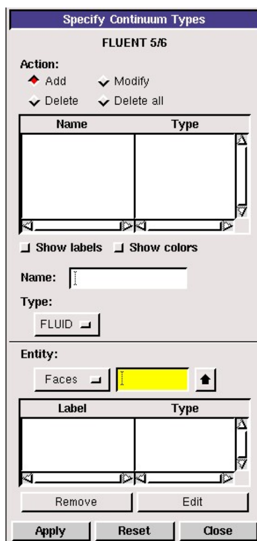


图 4-26　Specify Continuum Types 面板

4.2.4　GAMBIT 与其他软件的联用

简单的三维模型可以直接在 GAMBIT 中建立，但是复杂的几何体就需要借助其他 CAD/CAE 软件。GAMBIT 允许从 Pro/ENGINEER、ANSYS、SolidWorks、PATRAN、UG、I-DEAS、CATIA 等导入几何体和网格。下面简单介绍 AutoCAD 与 GAMBIT 的联用。

将 AutoCAD 绘制好的图形导入 GAMBIT，需要以下几个步骤：

（1）在 AutoCAD 中完成模型的绘制。

（2）执行 File→Export，选择类型为 ACIS(*.sat)，输入文件名。

（3）在打开的 GAMBIT 中执行 File→Import→ACIS，输入文件名或者单击 Browse 按钮选取。

4.3　GAMBIT 应用实例

4.3.1　三维直通管内的湍流模型与网格划分

1．实例概述

如图 4-27 所示，水流通过一根 10m长的水平直通管，其中入口速度是 1m/s，水的密度是 1kg/m^3，运动粘度为 μ=2×10^{-5} kg/(ms)，管内径为 0.2m。计算出雷诺数为 10000，可知该流体运动为完全湍流流动。下面在GAMBIT中建立该湍流模型并对其进行网格划分。

2．在 GAMBIT 中建立模型

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

1 P1
2 P16
3 P34
第 4 章 网格生成软件 GAMBIT
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254





图 4-27　三维直通管模型

02 单击 Geometry→Face→Create Real Circle，在如图 4-28 所示的 Create Real Circular Face 面板的 Radius 文本框中先输入 0.1，保持 Plane 选项为 XY，单击 Apply 按钮，得到如图 4-29 所示的图形。单击 Fit to Window 按钮，可以调节图形与窗口大小的关系。

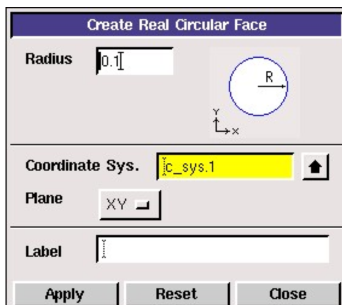


图 4-28　Create Real Circular Face 面板

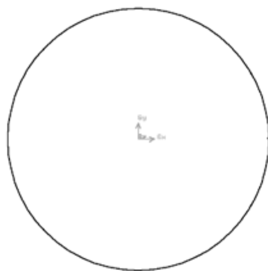


图 4-29　几何面域

03 单击 Geometry→ Vertex→Create Real Vertex，按照表 4-3 创立各点。单击 Apply 按钮，生成管轴上的另一点。

表 4-3　管轴上各点坐标

X	Y	Z
0	0	0
0	0	10

04 接着创建线。单击 Geometry→Edge→Create Straight Edge，按住〈Shift〉按键，再单击前面创建的两个点，或者在 Vertices 选项中选择需要的两个点，单击 Apply 按钮，生成体轴线，如图 4-30 所示。

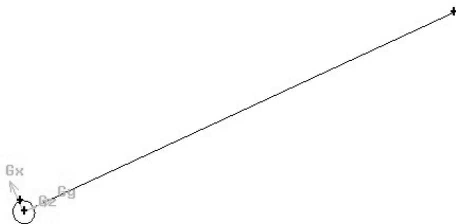


图 4-30　绘制轴线

05 单击 Geometry→Volume→Sweep Real Faces，弹出 Sweep Faces 面板，如图 4-31 所示。在 Faces 文本框中选取面 1，Path 选项选择 Edge，在 Edge 文本框中选取刚绘



制的轴线，保持 Type 选项为 Rigid，单击 Apply 按钮，得到几何体，如图 4-32 所示。

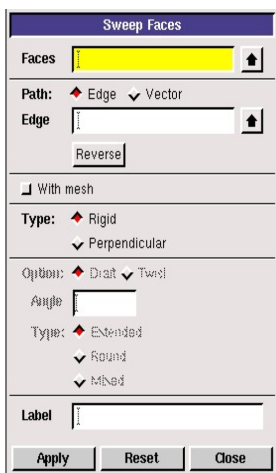


图 4-31　Sweep Faces 面板

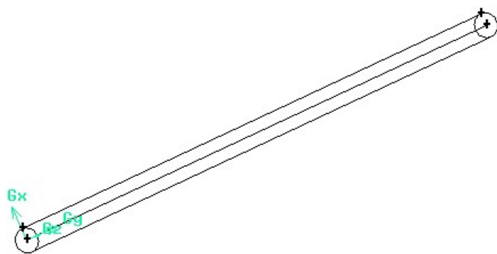


图 4-32　几何体

06 去掉几何体轴线，单击 Edge 面板中的 Delete Edges 按钮，选中轴线，单击 Apply 按钮，将轴线删除，即得到所需要的几何模型，如图 4-33 所示。

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Edge→Mesh Edges，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色文本框中选择两条圆弧，采用 Interval Count 的方式将其分为 30 份，Division Length 选项选择 0.001。选择 Type 选项为 First Length，Soft link 选项选择 maintain。得到线网格，如图 4-34 所示。

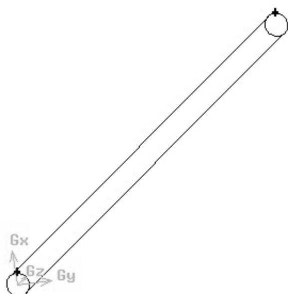


图 4-33　生成的几何模型

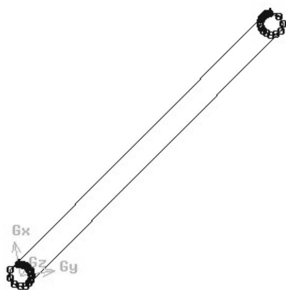


图 4-34　线网格的划分

02 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，先选择两个圆面，保持默认值，单击 Apply 按钮。然后选择需要被划分的外表面，选择 Interval Count 的方式将其分为 100 份，运用 Quad 单元与 Map 的方式，单击 Apply 按钮。面的网格生成情况如图 4-35 所示。

4．边界定义

01 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中将左边的面定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 inlet；将右边的面定义为压力出口

1 P1
2 P16
3 P34
第 4 章 网格生成软件 GAMBIT
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

（PRESSURE_OUTLET），名称为 outlet；选择环壁面定义为 WALL，名称为 wall，如图 4-36 所示。

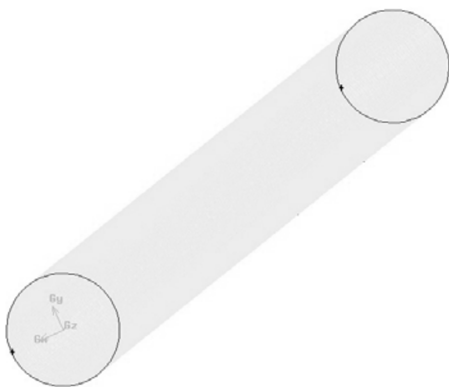


图 4-35　面网格的划分

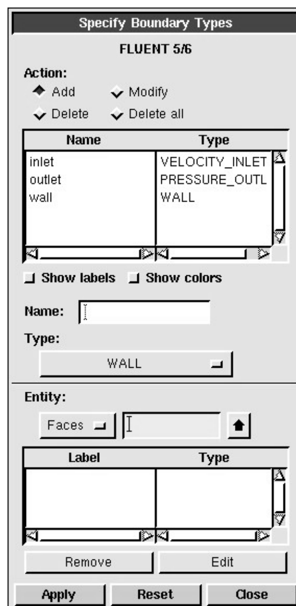


图 4-36　Specify Boundary Types 面板

02 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model1.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。

4.3.2　二维轴对称喷嘴模型与网格划分

1．实例概述

如图 4-37 所示，根据参考数据建立 GAMBIT 模型并对其进行网格划分。

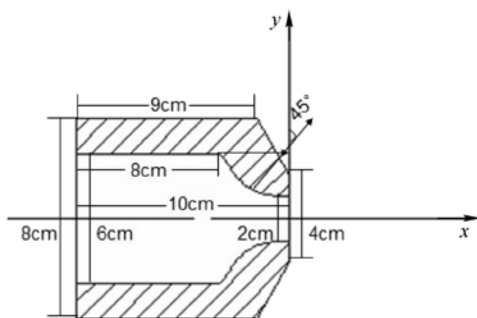


图 4-37　二维轴对称喷嘴模型

2．在 GAMBIT 中建立模型

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 Geometry→Vertex→Create Real Vertex，在 Create Real Vertex 面板中根据表 4-4 建立点。



表 4-4　各点坐标

X	Y	Z
0	0	0
–10	0	0
0	1	0
–2	3	0
–10	3	0
0	3	0
0	2	0
–1	4	0
–10	4	0
–10	10	0
20	0	0
20	10	0

03 接着创建线。单击 Geometry→Edge→Create Straight Edge，按住〈Shift〉按键，再单击前面创建的点，或者在 Vertices 选项中选择需要的两个点，单击 Apply 按钮，如图 4-38 所示。单击按钮，在 Vertex 面板中单击按钮，删除中心点（0，3，0）。

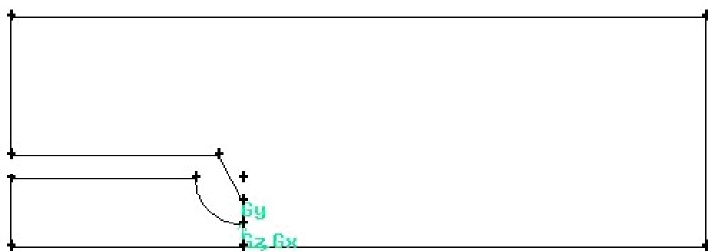


图 4-38　绘制轴线

04 单击 Geometry→Face→Create Face From Wireframe，在如图 4-39 所示的 Create Face From Wireframe 面板的 Edges 黄色文本框中选取所需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何平面，如图 4-40 所示。

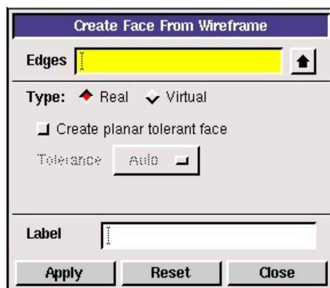


图 4-39　Create Face From Wireframe 面板

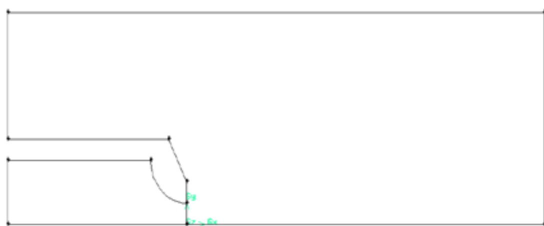


图 4-40　平面模型

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，在 Mesh Faces 面板的 Faces 黄色文本框中选择喷嘴面，采用 Interval Count 的方式将其分为 30 份，Elements 选项选择 Quad，Type 选项选择 Map。得到喷嘴面网格，如图 4-41 所示。

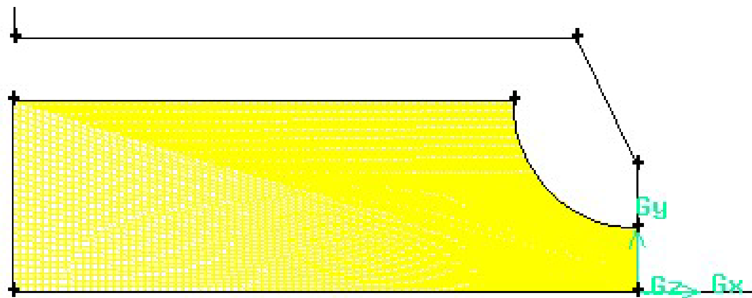


图 4-41 喷嘴面网格的划分

02 选择喷嘴外部的面，在 Mesh Faces 面板的 Faces 黄色文本框中选择外区域面，采用 Interval Count 的方式将其分为 80 份，Elements 选项选择 Quad，Type 选项选择 Submap。得到外区域面网格，如图 4-42 所示。

4．边界定义

01 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中将喷嘴面左边的线段定义压力入口（PRESSURE_INLET），名称为 inlet；将右边的线段定义为压力出口（PRESSURE_OUT），名称为 outlet；上边缘曲线定义为 WALL，名称为 wall；下边缘曲线定义为 AXIS，名称为 centerline，如图 4-43 所示。

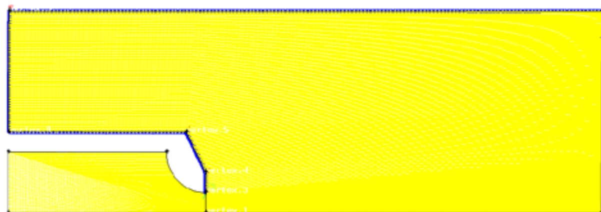
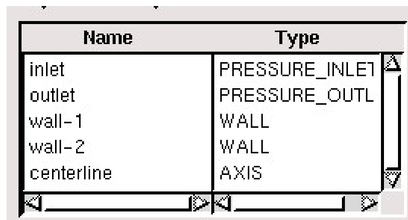


图 4-42 外区域面网格的划分



Name	Type
inlet	PRESSURE_INLET
outlet	PRESSURE_OUTL
wall-1	WALL
wall-2	WALL
centerline	AXIS

图 4-43 Specify Boundary Types 面板

02 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model2.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4.3.3 三维 V 形管道模型与网格划分

1．实例概述

如图 4-44 所示的三维 V 形管道，其宽为 1cm，高为 1cm，两个管道之间夹角为 45°，管道长 10cm，水流从左口流入，速度为 1m/s

2．在 GAMBIT 中建立模型

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。



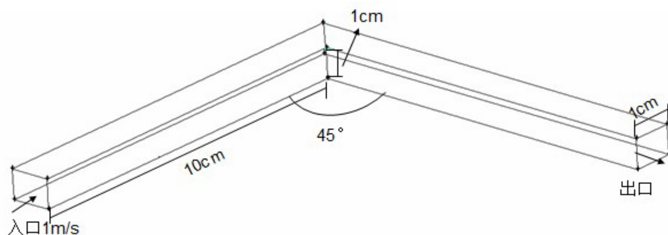


图 4-44　三维 V 形管道模型

02 单击 Geometry→Vertex→Create Real Vertex，在 Create Real Vertex 面板中根据表 4-5 建立点。

表 4-5　各点坐标

X	Y	Z
0	0	0
–10	10	0
–9	11	0
10	10	0
9	11	0
0	2	0

03 接着创建线。单击 Geometry→Edge→Create Straight Edge，按住〈Shift〉按键，再单击前面创建的点，或者在 Vertices 选项中选择需要的两个点，单击 Apply 按钮，如图 4-45 所示。

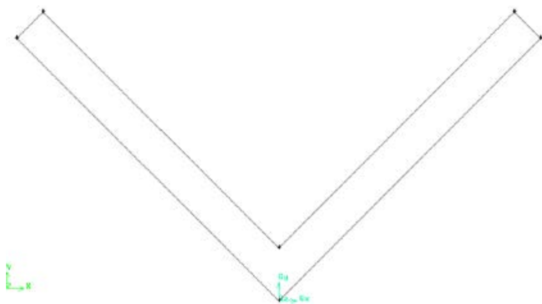


图 4-45　绘制轴线

04 单击 Geometry→Face→Create Face From Wireframe，在 Create Face From Wireframe 面板的 Edges 黄色文本框中选取所需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何平面。

05 接着创建体。执行 Geometry→Volume→Sweep Faces命令，弹出如图 4-46 所示的 Sweep Faces 面板。在 Faces 文本框中选择生成的面，Path 选项选择为 Vector，单击 Define 按钮，弹出如图 4-47 所示的 Vector Definition 面板，选择 Magnitude 选项，并填写 1，单击 Apply 按钮，得到三维实体图，如图 4-48 所示。按住鼠标左键就可以转动角度观察

1 P1
2 P16
3 P34
第 4 章 网格生成软件 GAMBIT
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

三维视图。

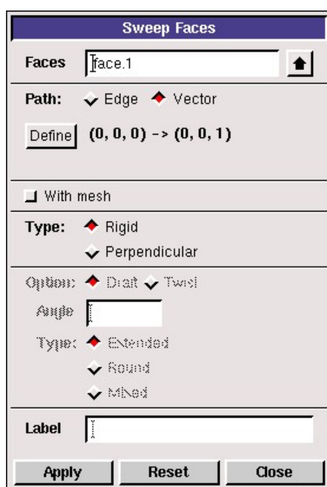


图 4-46　Sweep Faces 面板

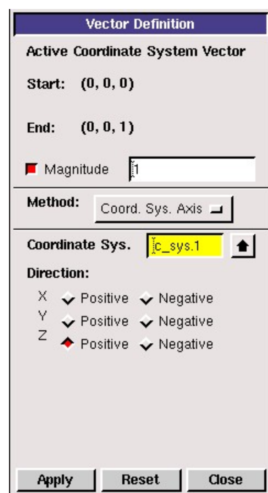


图 4-47　Vector Definition 面板

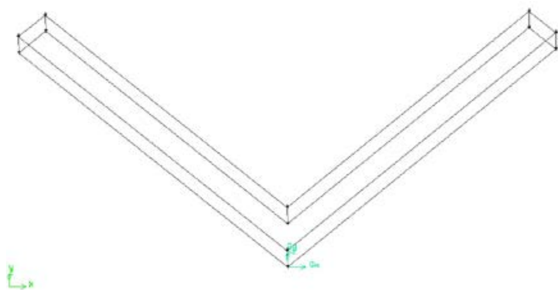


图 4-48　三维 V 形管道实体图

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，在 Mesh Faces 面板的 Faces 黄色文本框中选择入口面，采用 Interval Count 的方式将其分为 20 份，如图 4-49 所示。

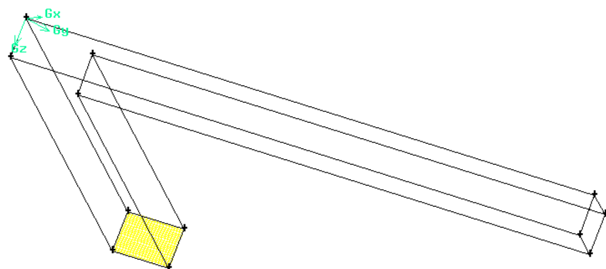


图 4-49　入口面网格的划分

02 单击 Mesh→Volume→Mesh Volumes，在 Mesh Volumes 面板的 Volumes 黄色文本框中选择整个体，其他选项保持默认值，如图 4-50 所示。单击 Apply 按钮，得到



体网格的划分，如图 4-51 所示。

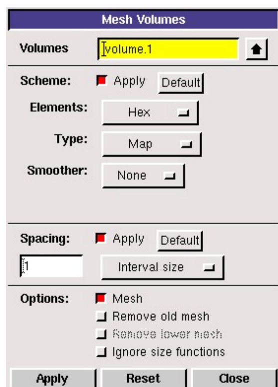


图 4-50　Mesh Volumes 面板

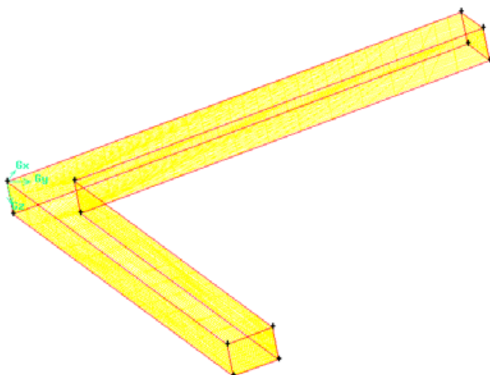
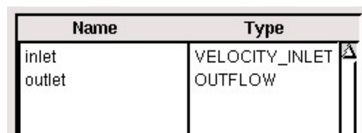


图 4-51　体网格的划分

4．边界定义

01 单击 Zones →Specify Boundary Types ，在 Specify Boundary Types 面板中的 Entity 选项中选择 Faces，选择入口面定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 inlet；将出口面定义为出口（OUTFLOW），名称为 outlet；其他面保持默认值，均默认为 WALL，如图 4-52 所示。



Name	Type
inlet	VELOCITY_INLET
outlet	OUTFLOW

图 4-52　Specify Boundary Types 面板

02 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model9.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。

4.3.4　二维搅拌模型与网格划分

1．实例概述

如图 4-53 所示的二维搅拌模型，其中外部圆筒的半径为 50cm，搅拌桨长 20cm，为半圆状，每两个搅拌桨之间角度为 120°。

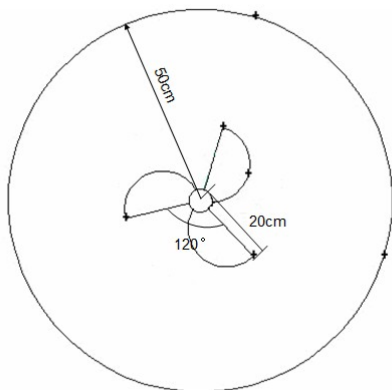


图 4-53　二维搅拌模型

2．在 GAMBIT 中建立模型

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 Geometry →Vertex →Create Real Vertex ，在 Create Real Vertex 面板中根据表 4-6 建立点，如图 4-54 所示。

表 4-6　各点坐标

X	Y	Z
0	0	0
5	0	0
0	5	0
0	2	0
1	1	0



图 4-54　创建的点

03 接着创建外部圆和搅拌桨的圆弧。先连接外部圆，单击 Geometry →Edge →Create Real Full Circle ，弹出如图 4-55 所示的 Create Real Full Circle 面板，Method 选项选择 ，在 Vertices 选项中 Center 选择中心点，End-Points 选择外圆上的两个点，单击 Apply 按钮，即生成外面的圆，如图 4-56 所示。

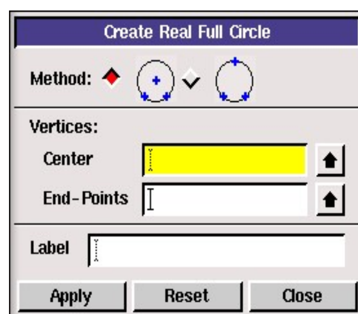


图 4-55　Create Real Full Circle 面板

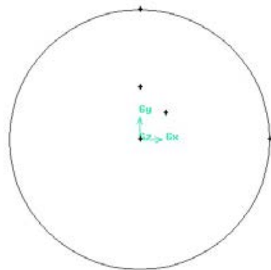


图 4-56　外部圆线

04 接着创建搅拌桨。单击 Geometry →Edge →Create Straight Edge ，按住〈Shift〉按键，再单击前面创建的点，或者在 Vertices 选项中选择需要的两个点，单击 Apply 按钮，生成线。单击 Geometry →Edge →Create Real Circular Arc ，弹出如图 4-57 所示的 Create Real Circular Arc 面板，Method 选项中选择 ，在 Vertices 选项中选择搅拌桨上的 3



个点，注意选择方向会影响画出的弧的方向，单击 Apply 按钮，生成弧，如图 4-58 所示。

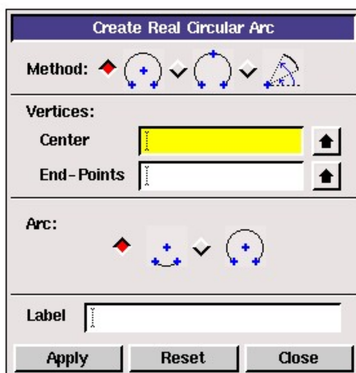


图 4-57　Create Real Circular Arc 面板

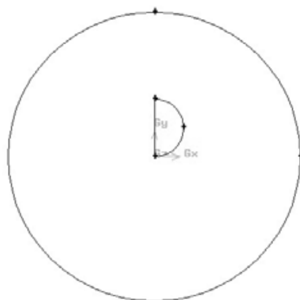


图 4-58　绘制弧线

05 创建面。单击 Geometry→Face→Create Face From Wireframe，在 Create Face From Wireframe 面板的 Edges 黄色文本框中选取所需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成一个外圆面以及一个搅拌桨面。下面对生成的搅拌桨面进行复制，从而生成另外两个搅拌桨面。单击 Face 面板上的按钮，弹出 Move/Copy Faces 面板，在 Faces 选项中选择生成的搅拌桨面，选择 Copy 选项，并填写 2，意思是要复制两个搅拌桨面。在 Operation 选项中选择 Rotate，在 Angle 文本框中填写 120°，其他选项保持默认值，单击 Apply 按钮，即生成另外两个搅拌桨面，如图 4-59 所示。

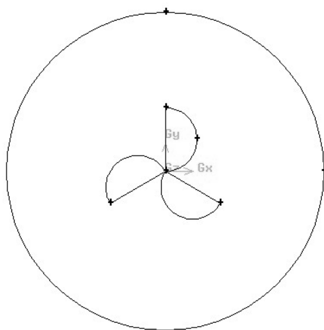


图 4-59　平面模型 1

06 接着需要创建搅拌桨中心小圆面以及所在区域的圆面。可以直接执行 Geometry→Face→Create Real Circular Face命令，弹出如图 4-60 所示的 Create Real Circular Face 面板，输入半径，单击 Apply 按钮，如图 4-61 所示。

综合图 4-59，可知实际的流体区域是除去扇形搅拌桨的区域。下面通过面的布尔运算得到实际需要计算的区域。

07 执行 Geometry→Face→Subtract Real Faces命令，打开如图 4-62 所示的 Subtract Real Faces 面板，先从外圆面减去内小圆面，在第一个 Face 文本框中选择外圆面，在下面的 Faces 文本框中选择内圆面，注意要保留内圆面，即选中 Retain 选项。同理，接着

1 P1
2 P16
3 P34
第 4 章 网格生成软件 GAMBIT
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

从内圆面中减去搅拌桨面，这样就得到一个圆环面以及除去搅拌桨面后剩下的面，如图 4-63 所示。

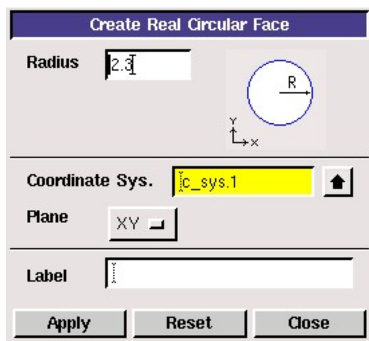


图 4-60　Create Real Circular Face 面板

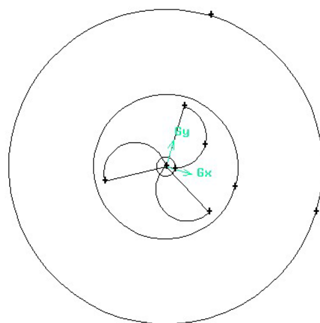


图 4-61　平面模型 2

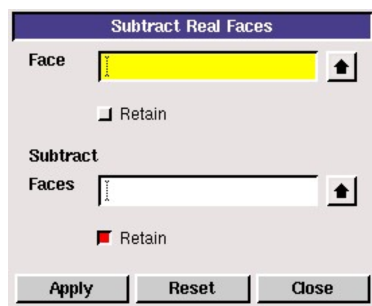


图 4-62　Subtract Real Faces 面板

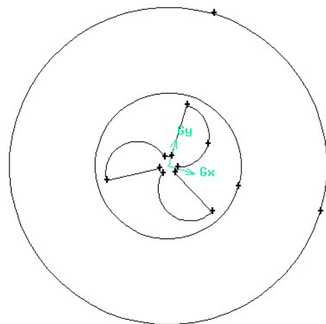


图 4-63　计算区域面

3．网格的划分

单击 Mesh→Face→Mesh Faces，在 Mesh Faces 面板的 Faces 黄色文本框中选择外圆环面，采用 Interval Size 的方式，填写 0.1，单击 Apply 按钮。再选择内圆剩下的面，采用 Interval Size 的方式，填写 0.1，单击 Apply 按钮，最后得到计算几何区域的面网格，如图 4-64 所示。

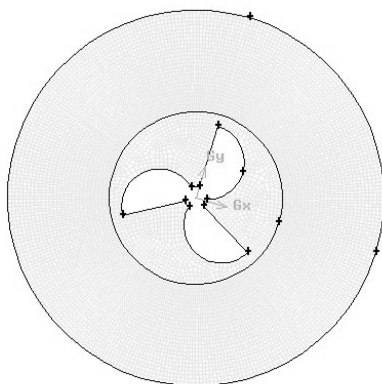


图 4-64　计算几何区域的面网格的划分



4．边界定义

01 单击 Zones→Specify Continuum Types，在 Specify Continuum Types 面板中的 Type 选项中选择 FLUID，Entity 选项中选择 Faces，先选择外圆环面，名称为 fluid1，单击 Apply 按钮；同理选择圆内面，名称为 fluid2，如图 4-65 所示。

Name	Type
fluid.1	FLUID
fluid.2	FLUID

图 4-65　Specify Continuum Types 面板

02 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model4.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4.3.5　三维气体吸收塔模型与网格划分

1．实例概述

工业上常用气体吸收塔，如二氧化硫吸收塔，二氧化硫废气从塔底部进入，遇到顶部进入的水，生成亚硫酸，遇到空气生成液体硫酸，净化后的废气就可以从顶部出气口排出。图 4-66 是三维气体吸收塔的基本模型，现用 GAMBIT 建立该模型并进行网格划分。

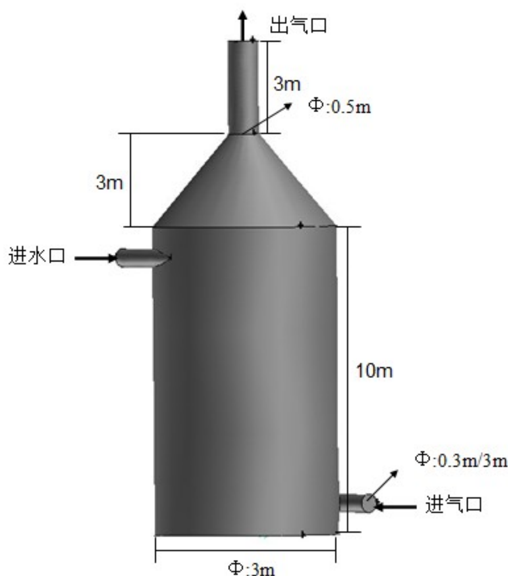


图 4-66　三维气体吸收塔模型

2．在 GAMBIT 中建立模型

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 直接创建体。执行 Geometry→Volume→Create Real Cylinder命令，弹出如图 4-67 所示的 Create Real Cylinder 面板。在 Height 文本框中填写 10，Radius1 文本框中

填写 3，单击 Apply 按钮，即得到圆柱体图，如图 4−68 所示。按住鼠标左键就可以转动角度观察三维视图。

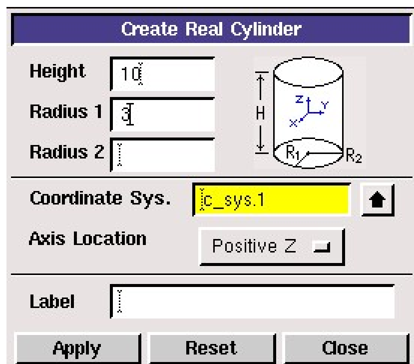


图 4−67　Create Real Cylinder 面板

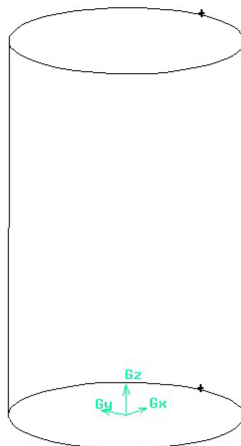
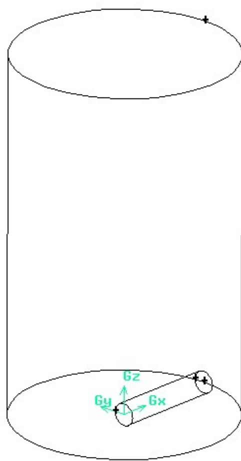


图 4−68　圆柱体

03 创建进气口。在 Create Real Cylinder 面板中，Height 文本框中填写 3，Radius1 文本框中填写 0.3，Axis Location 选项中选择 Positive X，单击 Apply 按钮，生成进气口模型，如图 4−69 所示。然后将生成的小圆柱体移到大圆柱体表面，执行 Move/Copy Volumes 命令，选择小圆柱体，选择 Move 选项，移动至（0，2.7，1），单击 Apply 按钮，小圆柱即移动到大圆柱边缘。



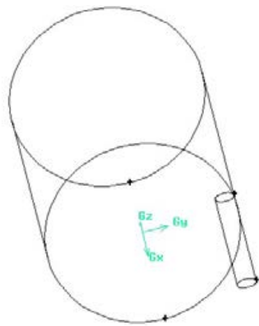


图 4−69　进气口模型

04 创建塔上部的进水口。执行 Move/Copy Volumes 命令，选择小圆柱体，选择 Copy 命令，在 Operation 选项中选择 Rotate，在 Angle 文本框中填写 180，其他选项保持默认值，单击 Apply 按钮，即生成进水口。然后根据进气口移动的方法处理进水口，Global 文本框中填写（0，0，8），单击 Apply 按钮，完成对进水口的创建，如图 4−70 所示。



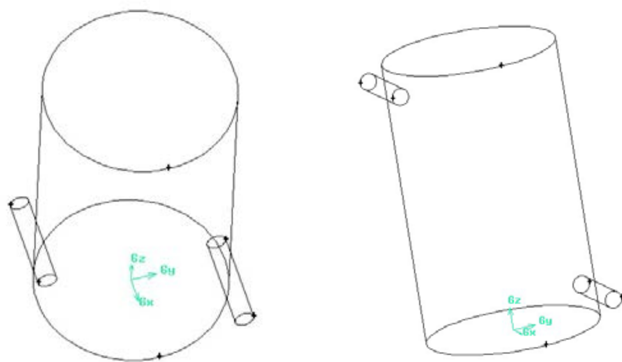


图 4-70　进水口模型

05 合并生成的几何体。执行 Unite Real Volumes 命令，弹出如图 4-71 所示的 Unite Real Volumes 面板，在 Volumes 文本框中选择所有的 Volumes，单击 Apply 按钮，即将这 3 个几何体合并成一个几何体，如图 4-72 所示。

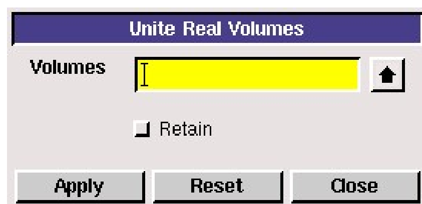


图 4-71　Unite Real Volumes 面板

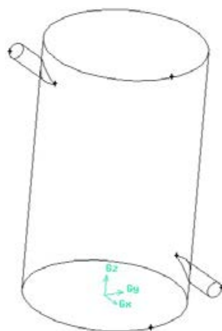


图 4-72　合并后的几何体

06 创建吸收塔塔顶，执行 Geometry→Volume→Create Real Truncated Cone 命令，Height 文本框填写 3，Radius1 文本框填写 3，Radius2 文本框填写 0.5，单击 Apply 按钮，生成圆台型塔顶。然后移动至大圆柱的顶部，如图 4-73 所示。出气口的创建与进气口的方法相同，要注意的是 Axis Location 选项要选择 Positive Z，最后移动其至圆台顶端。

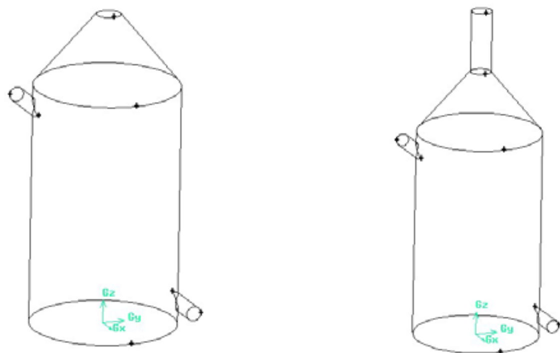


图 4-73　吸收塔塔顶及出气口的创建

1 P1
2 P16
3 P34
第 4 章 网格生成软件 GAMBIT
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

07 同上合并生成的几何体。

3．网格的划分

单击 Mesh→Volume→Mesh Volumes，在 Mesh Volumes 面板的 Volumes 黄色文本框中选择生成的体，Type 选项选择 TGrid，采用 Interval Size 的方式，并填写 0.5，如图 4-74 所示。单击 Apply 按钮，生成几何体网格，如图 4-75 所示。

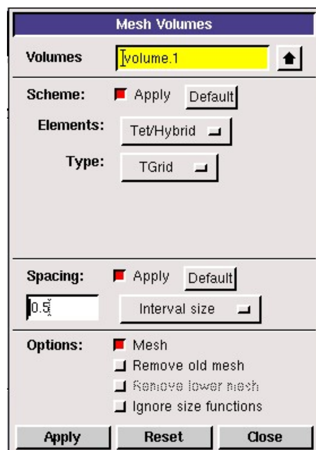


图 4-74　Mesh Volumes 面板



图 4-75　几何体网格的划分

4．边界定义

01 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中的 Entity 选项中选择 Faces，选择气体入口面定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 inlet-1；选择液体入口面定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 inlet-2；将气体出口面定义为出口（OUTFLOW），名称为 outlet；其他面保持默认值，均默认为 WALL，如图 4-76 所示。

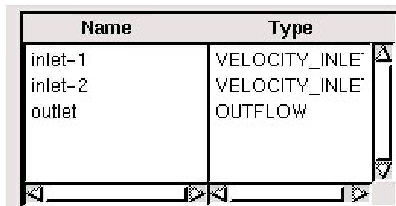


图 4-76　Specify Boundary Types 面板

02 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model9.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。

4.3.6　三管相贯模型与网格划分

1．实例概述

生产中经常遇到 3 根相通的管子连接在一起分流。本例模拟了一个三通管的三维模型并对其进行网格划分和边界定义。已知每根管道直径为 0.6m，长 1m，水从顶部管道以 1m/s 的



速度流入，分别从下部的两个出口流出，如图 4-77 所示。

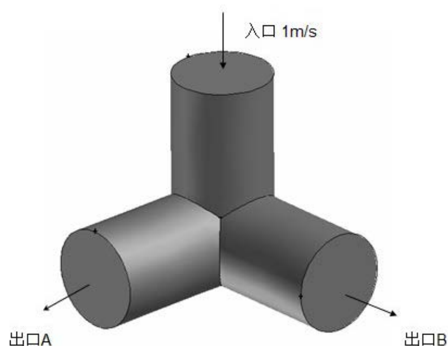


图 4-77　三通管实例模型

2．在 GAMBIT 中建立模型

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 直接创建体。执行 Geometry→Volume→Create Real Cylinder命令，弹出如图 4-78 所示的 Create Real Cylinder 面板。在 Height 文本框中填写 10，Radius1 文本框中填写 3，单击 Apply 按钮，得到圆柱体图，如图 4-79 所示。按住鼠标左键就可以转动角度观察三维视图。

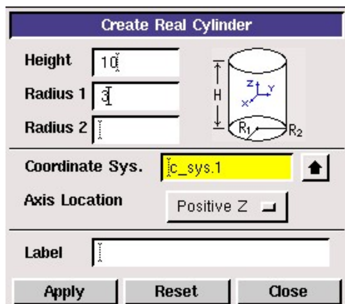


图 4-78　Create Real Cylinder 面板



图 4-79　圆柱体

03 同理，创建另外两个圆柱体，其他数据保持不变，只是在 Axis Location 选项中选择 Positive X 和 Positive Y，单击 Apply 按钮，生成另外两个圆柱体，如图 4-80 所示。

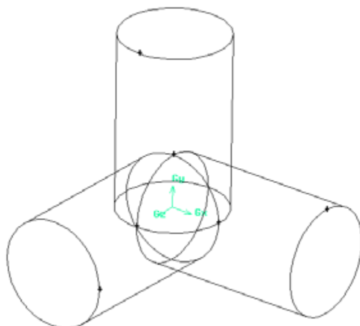


图 4-80　基本圆柱模型



04 单击 Geometry→Volume→Create Real Sphere，弹出如图 4-81 所示的 Create Real Sphere 面板。在 Radius 文本框中输入 3，单击 Apply 按钮，生成 3 个圆柱相交的球体，如图 4-82 所示。

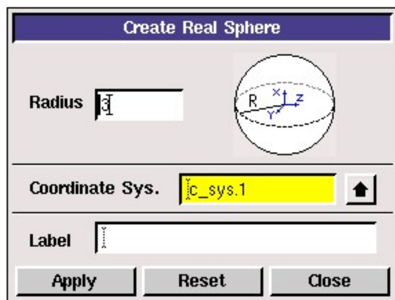


图 4-81 Create Real Sphere 面板

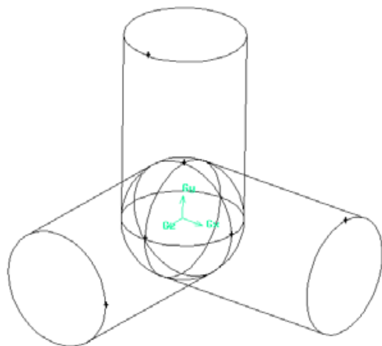


图 4-82 几何体简图

05 单击 Geometry→Volume→Unite Real Volumes，弹出如图 4-83 所示的 Unite Real Volumes 面板。选择所有的几何体，单击 Apply 按钮，合成一个几何体，如图 4-84 所示。

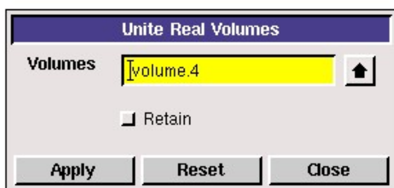


图 4-83 Unite Real Volumes 面板

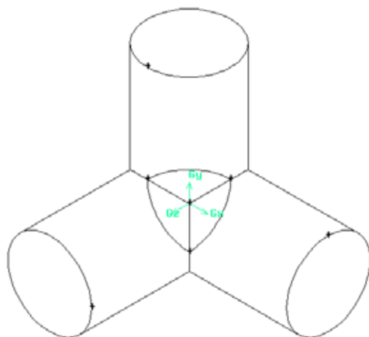


图 4-84 合并后的几何体

06 单击 Geometry→Volume→Create Volume，创建一个边长为 5 的立方体，用来分割 1/8 球体，如图 4-85 所示。

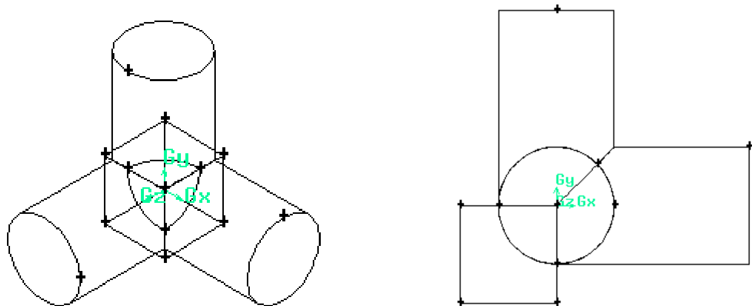


图 4-85 几何体三维视图



07 单击 Geometry→Volume→Split Volume，弹出如图 4-86 所示的 Split Volume 面板。在第一个 Volume 文本框中选择 volume 1，第二个 Volume 文本框中选择 volume 2，并选择 Connected 选项，单击 Apply 按钮，生成 1/8 球体和三通管体，如图 4-87 所示。

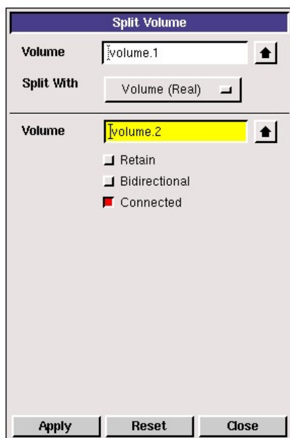


图 4-86　Split Volume 面板

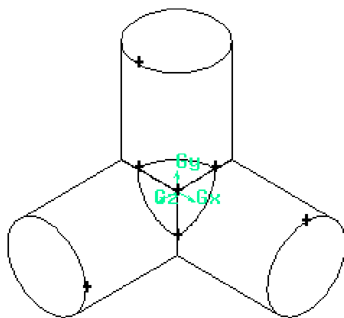


图 4-87　分割后的几何体

08 单击 Geometry→Edge→Create Straight Edge，在 Create Straight Edge 面板中选择中心点和 3 个柱体相交的顶点，单击 Apply 按钮，生成共享边，如图 4-88 所示。

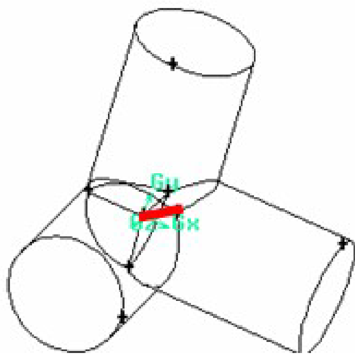


图 4-88　生成共享边

09 单击 Geometry→Face→Create Face From Wireframe，在 Create Face From Wireframe 面板的 Edges 黄色文本框中选取刚生成的边以及与该线段围成一个平面的曲线和另一条线段，单击 Apply 按钮，生成一个相交面。同理，生成另两个相交面，如图 4-89 所示。

10 单击 Geometry→Volume→Split Volume，选择三通管体（Volume 1），在 Split With 选项中选择 Face(Real)，Face 选项中选择刚创建的 3 个面中的一个。单击 Connected 按钮，单击 Apply 按钮，即生成一个与 1/8 球体相连的圆柱体，同理用生成的另外两个面进行相同的操作，最后生成 3 个与 1/8 球体相连的圆柱体，如图 4-90 所示。

1 P1
2 P16
3 P34
第 4 章 网格生成软件 GAMBIT
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

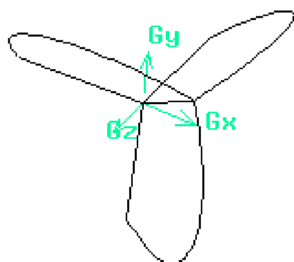


图 4-89　3 个相交面

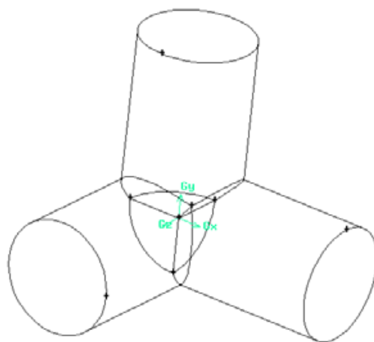


图 4-90　3 个与 1/8 球体相连的圆柱体

3．网格的划分

考虑到水流近壁面的粘性效应，首先需要绘制边界层网络。具体操作步骤如下。

01 单击 Mesh→Boundary Layer→Create Boundary Layer，弹出 Create Boundary Layer 面板，在 Edges 黄色文本框中选取 1/8 球体与柱体相交的 3 条边，视图中该线会出现一个红色的箭头，代表着边界层生成的方向（该方向应冲向圆心，若没有，需要单击〈Shift+鼠标中键〉改变方向）。然后选取 1:1 的边界层生成方式，并设置 First Row 文本框为 0.1m，Growth Factor 文本框为 1.4，Rows 文本框为 4。最后，单击 Apply 按钮，完成对边界层网格的绘制。按照同样的方式生成三管相交面的边界网格，如图 4-91 所示。

02 单击 Mesh→Volume→Mesh Volume，选择 1/8 球体，保持默认值，单击 Apply 按钮，即生成球体的体网格，如图 4-92 所示。

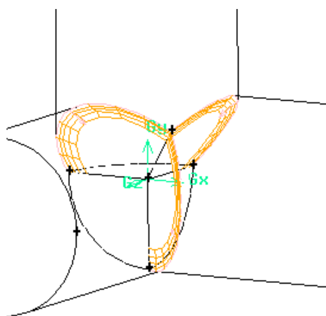


图 4-91　三管相交面的边界网格

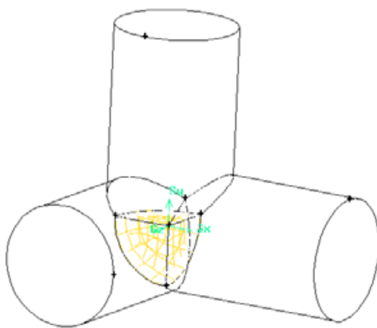


图 4-92　球体的体网格

03 对柱体进行网格划分。对 Y 轴方向的柱体采用 Cooper 的划分方式。单击 Mesh→Face→Set Face Vertex Type，弹出 Set Face Vertex Type 面板，如图 4-93 所示。在 Face 文本框中选择 Y 轴柱体壁面，Vertices 文本框选择三柱交点，单击 Apply 按钮，该交点就由“E”变为“S”，即顶点被设置成 Side，如图 4-94 所示。

04 单击 Mesh→Volume→Mesh Volume，选中 Y 轴方向的柱体，选择 Hex 和 Cooper 的划分方式，其他保持默认值，单击 Apply 按钮，完成对该柱体的体网格划分，如图 4-95 所示。



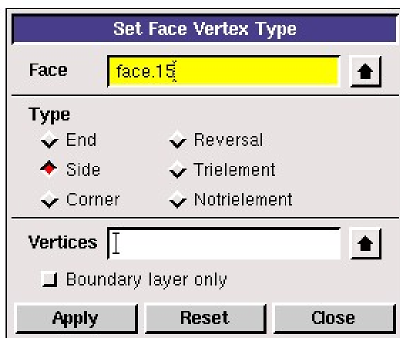


图 4-93　Set Face Vertex Type 面板

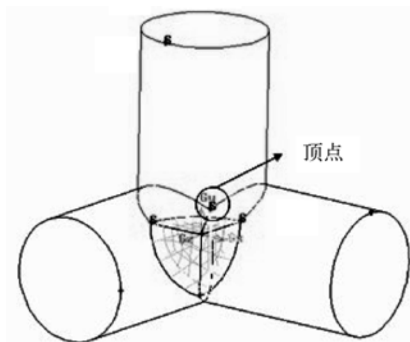


图 4-94　顶点被设置成 Side 的几何体

05 对 Z 轴方向的柱体进行网格划分。单击 Mesh →Face →Mesh Faces ，弹出 Mesh Faces 面板，选择 Z 轴方向柱体壁面，采用 Quad 和 Submap 的面网格划分方式，单击 Apply 按钮。然后单击 Mesh →Volume →Mesh Faces ，选中 Z 轴方向的柱体，选择 Hex 和 Cooper 的划分方式，其他保持默认值，单击 Apply 按钮，完成对该柱体的体网格划分，如图 4-96 所示。

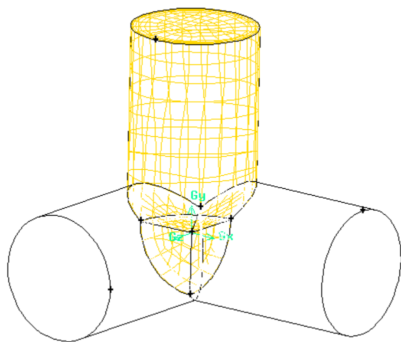


图 4-95　Y 轴柱体体网格的划分

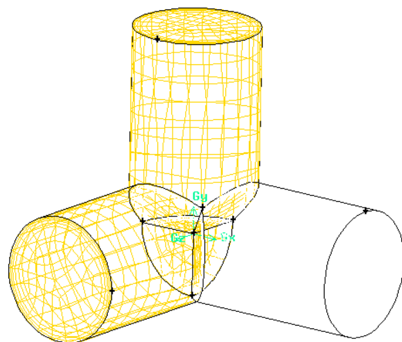


图 4-96　Z 轴柱体体网格的划分

06 对 X 轴方向上柱体网格的划分。单击 Mesh →Volume →Mesh Volume ，选中 X 轴方向的柱体，选择 Hex 和 Cooper 的划分方式，手动选择该柱体两端的 4 个面作为源面，单击 Apply 按钮，完成对 X 轴方向上柱体体网格的划分，如图 4-97 所示。

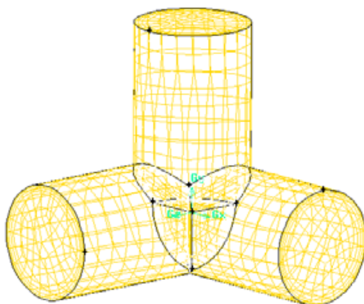


图 4-97　X 轴柱体体网格的划分

1 P1
2 P16
3 P34
第 4 章 网格生成软件 GAMBIT
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

4．边界定义

01 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中的 Entity 选项中选择 Faces，选择 Z 轴方向柱体入口面定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in；选择 Y 轴柱体出口面定义为 OUTFLOW，名称为 out-1；将 X 轴柱体出口面定义为出口（OUTFLOW），名称为 out-2；其他面保持默认值，均默认为 WALL，如图 4-98 所示。

Name	Type
in	VELOCITY_INLET
out-1	OUTFLOW
out-2	OUTFLOW

图 4-98　Specify Boundary Types 面板

02 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model10.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。



1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
第 5 章 Tecplot 软件使用入门
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

第 5 章　Tecplot 软件使用入门

Tecplot 软件是一种功能强大的绘图视觉处理软件。从简单的 *x-y* 曲线图、多种格式的 2D 和 3D 面绘图到 3D 体绘图格式，Tecplot 软件可快捷地将大量的资料转成容易了解的图表及影像。其表现方式有等高线、3D 流线、网格、向量、剖面、切片、阴影、上色等。

本章将简单介绍 Tecplot 软件的操作及其对 FLUENT 软件数据的后处理等。

5.1　Tecplot 软件概述

Tecplot 软件最初是由 Amtec 公司推出的，它针对 FLUENT 软件有专门的数据接口，可以直接读入*.cas 和*.dat 文件，也可以在 FLUENT 软件中选择输出的面和变量，然后直接输出 tecplot 格式文档。

Tecplot 软件可以进行科学计算，将计算机计算后的资料进行视觉化处理，便于更形象化地分析一些科学数据，它是一种传达分析结果功能强大的视觉化软件。Tecplot 软件可以用来建立一个图形、二维数据的等高线和矢量图块，还可以在一页上建立图形和图块或者对它们进行定位。每一个图形都是在一个文本框中，而这些框架可以被复制再修改，从而能很容易地对一个数据集显示其不同的视图。

5.1.1　Tecplot 软件的启动

在 Windows 操作系统中，启动 Tecplot 软件可以从“开始”菜单或者从桌面的快捷图标直接启动。具体步骤如下：

（1）单击“开始”菜单，并选择程序。

（2）选择 Tecplot 文件夹。

（3）双击 Tecplot 图标。

随着启动标志的加载完成，Tecplot 软件的开始界面就出现了，如图 5−1 所示。

5.1.2　Tecplot 软件的界面

在没有加载任何数据的情况下，Tecplot 软件的界面分成 4 个区，包括菜单栏、工具栏、状态栏和工作区，如图 5−2 所示。

1．菜单栏

通过菜单栏可以使用绝大多数 Tecplot 软件的功能，它的使用方式类似于一般的



Windows 程序，是通过对话框或者二级窗口来完成的，如图 5-3 所示。

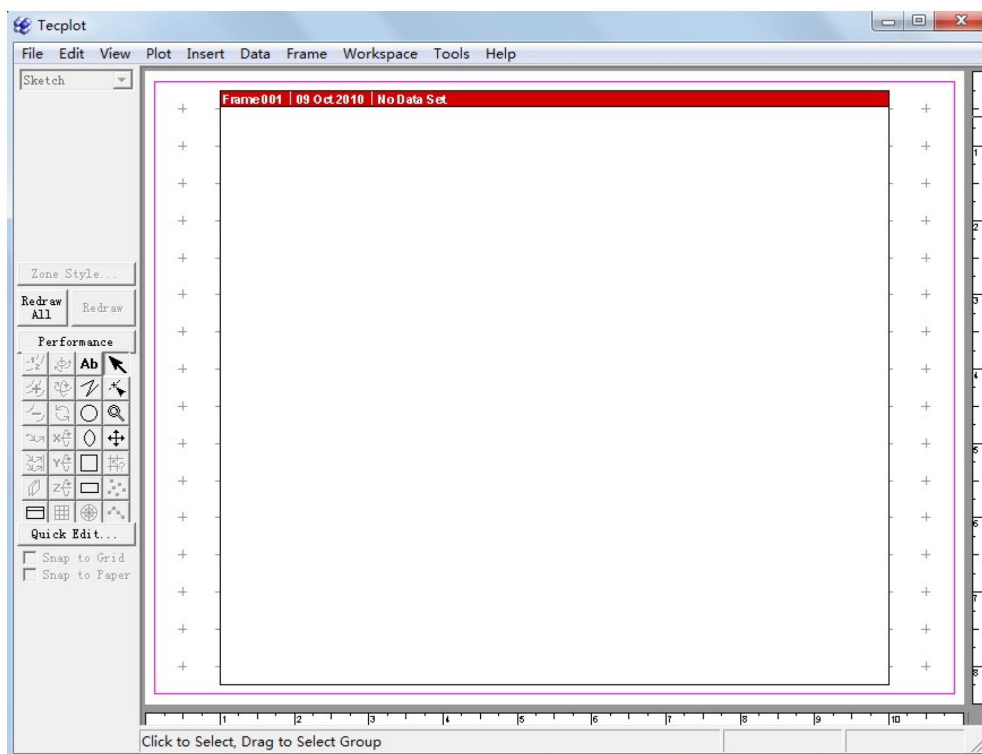


图 5-1　Tecplot 软件的开始界面

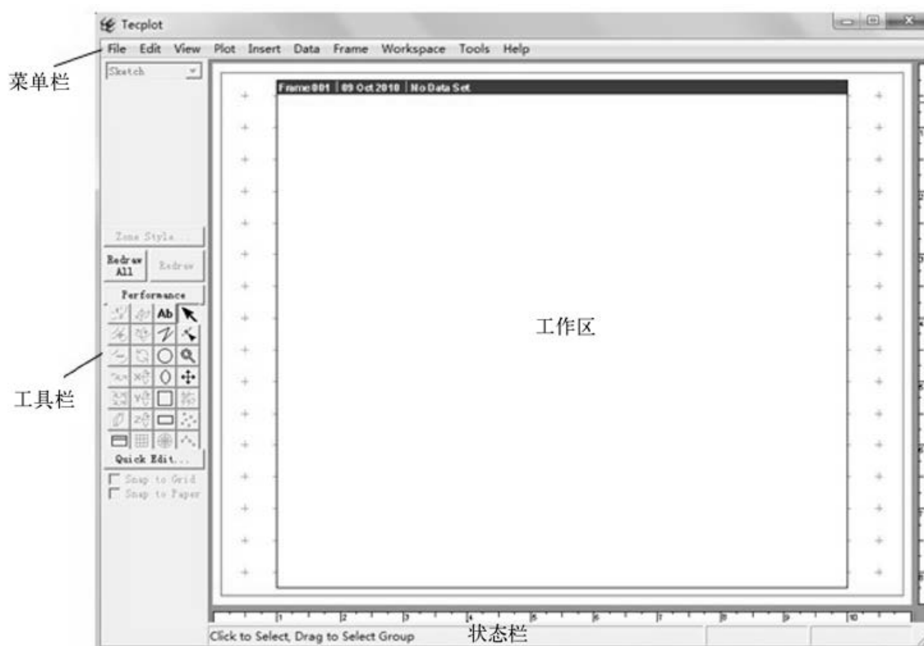


图 5-2　Tecplot 软件的界面分析

File　Edit　View　Plot　Insert　Data　Frame　Workspace　Tools　Help

图 5-3　菜单栏

Tecplot 软件的功能都包含在如下菜单中。

- File：进行文件的读/写、打印、输出曲线、记录宏、设定记录配置和退出。
- Edit：进行剪切、复制、粘贴、清除、上提与下压显示顺序、修改数据点等功能。Tecplot 软件的剪切、复制和粘贴只在 Tecplot 软件内部有用。如果想和 Windows 的其他程序交换图形，可以用 copy plot to clipboard 功能。
- View：用来控制观察数据位置，包括比例、范围、3-D 旋转，还可以用来进行帧之间的粘贴。
- Plot：绘制 X-Y 曲线，2D、3D 帧模式中的网格，等值线，矢量，阴影，流线，3-D 等值，3-D 切片，边界曲线等。
- Insert：插入文本，几何体（多线、圆、矩形、椭圆、正方形），数据标签，图像等功能。
- Data：用来创建、操纵、检查数据。在 Tecplot 中可以进行的数据操作包括创建区域、插值、三角测量以及创建和修改由类似 Fortran 公式创建的数据。
- Frame：创建、编辑、控制帧。
- Workspace：用来控制工作区的属性，包括色彩图例、页面网格、显示选项和标尺。
- Tools：用来快速运行宏，可以定义、创建。或者创建简单的动画。
- Help：打开帮助文档。

2．工具栏

通过 Tecplot 软件的工具栏，可以对经常用到的画图工具进行控制。许多工具的外形类似于要进行工作的性质。另外，工具栏还可以控制帧的模式、活动帧和快照模式。工具栏如图 5-4 所示。

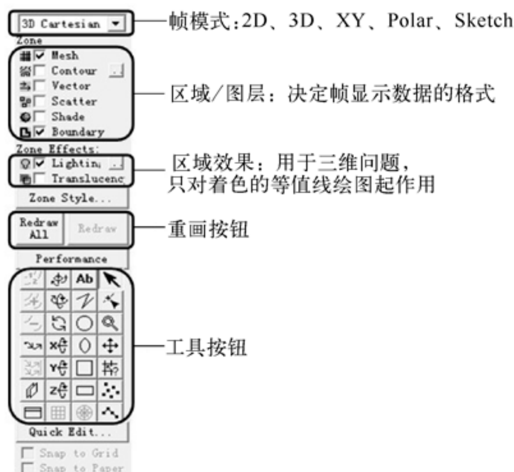


图 5-4　工具栏

（1）帧模式　帧模式决定了当前帧显示的图形格式，共有 4 种。

- 3D：创建 3-D 面或者体图像。
- 2D：创建 2-D 图像。
- XY：*xy* 曲线图。
- S（草图）：没有数据的图形，如流动图表和视图。

（2）区域/图形层　该选项决定了帧显示数据的格式。完全的绘图内容包括所有的图层、文字、几何形状以及添加于图形基本数据其他因素。共有 6 种区域的 2D 和 3D 帧模式、4 种 XY 帧模式，但没有草图模式。6 种 2D 和 3D 区域帧模式，如图 5−5 所示。

- Mesh（网格）：网格区域层用线连接数据点。
- Contour（等值线）：等值线区域层绘制等值线，可以是线、常值或线间的区域，或者两者都有。
- Vector（矢量）：绘制数值方向与大小。
- Scatter（散点）：在每一个数据点绘制符号。
- Shade（阴影）：用指定的固体颜色对指定区域进行着色，或者对 3D 绘图添加光源。
- Boundary（边界）：对于指定区域绘制边界。

4 种 XY 模式下的图形层如图 5−6 所示。

- Lines（线状图）：绘制一对变量，线可以为分段线或者逼近线。
- Symbols（符号图）：绘制一对变量，由一个符号代表独立的数据点。
- Error Bars（误差柱状图）：该图形可以用几种格式绘制误差柱状图。
- Bars（柱状图）：绘制一对变量，水平或者垂直图表。

（3）区域效果　对于 3D 帧来说，会出现如图 5−7 所示的选择框。只对着色的等值线绘图起作用。

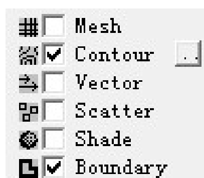


图 5−5　6 种 2D 和 3D 区域帧模式

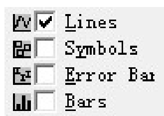


图 5−6　XY 模式下的图形层



图 5−7　区域效果选项

（4）重画按钮　重画按钮（Redraw Button）：Tecplot 软件并不在每次图表更新后都自动重画，除非选择自动重画（Automatically Redraw）。单击 Redraw 按钮可以手动更新。

- Redraw（重画）：指重画当前帧。
- Redraw All（全部重画）：重画全部帧，〈shift+redraw all〉组合键会重新生成工作区。
- 自动重画（Auto Redraw）：会连续不断地自动更新图表。

显示选项按钮（Display Option Button）：用来设定 Tecplot 软件的状态栏和性能参数。

绘图属性按钮（Plot Attributes Button）：可以打开绘图属性对话框进行区域显示设置。

工具按钮（Tool Button）：每一个工具按钮都有相应的鼠标形状，共有 28 种，12 类，如图 5−8 所示。



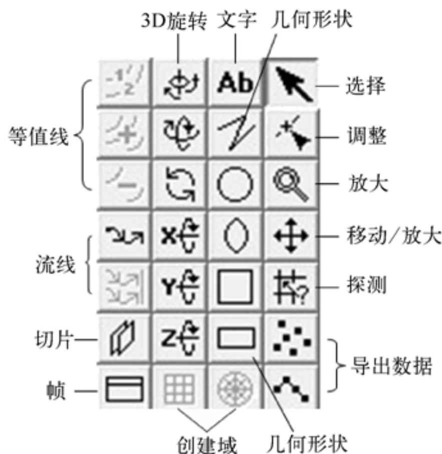


图 5-8　工具按钮与鼠标形状

3．状态栏

Tecplot 软件窗口底部的状态栏如图 5-9 所示。在鼠标移动过工具栏时，状态栏会给出帮助提示。工具栏的设定可以在 file→preferences 菜单中设定。



图 5-9　状态栏

4．工作区

工作区是进行绘图工作的区域，如图 5-10 所示。绘图工作都是在帧中完成的，类似于操作一个窗口。在默认情况下，Tecplot 软件显示网格和标尺。所有的操作都是在当前帧中完成的。

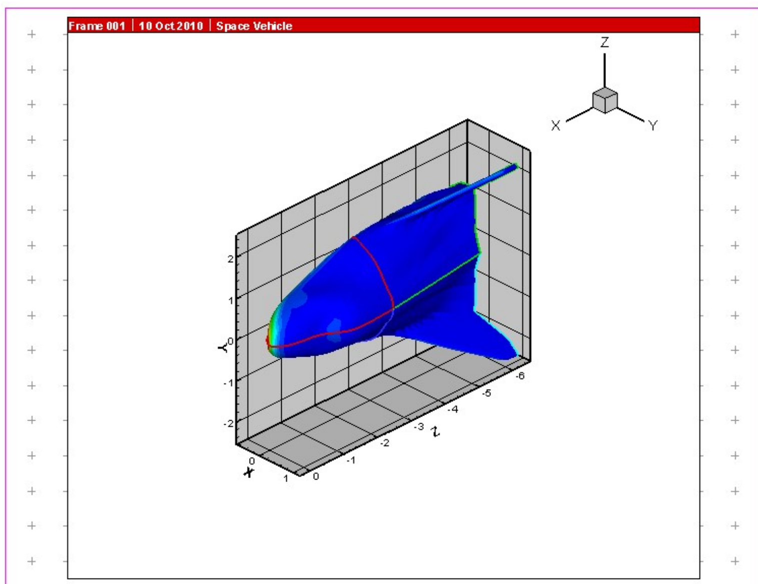


图 5-10　工作区

5.2 Tecplot 软件绘图环境设置

工作区是进行所有的绘图操作的区域，通过对工作区域的正确设置可以大大地方便绘图操作，同时可以提供更多的选择，使所绘制的图形更加丰富多彩。

5.2.1 帧的创建和编辑

在默认设置中，工作区仅有一个绘图帧，单击工具栏中的按钮，或者执行 Frame→Create New Frame 命令，此时光标变成“十字线”形状，按住鼠标左键并拖动即可以创建出一个新的绘图帧，如图 5-11 所示。

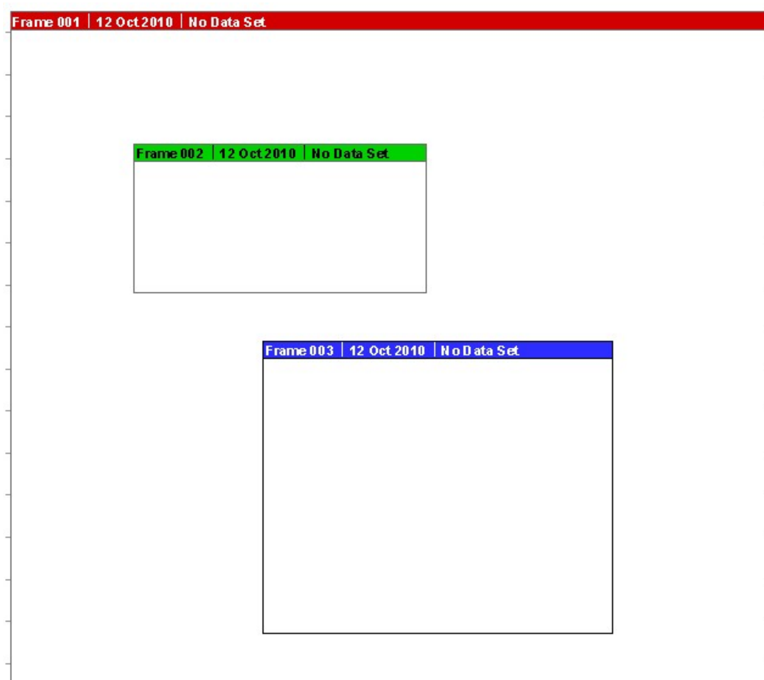


图 5-11 新帧的创建

创建帧以后，可以对新帧进行移动、删除、改变尺寸等操作。在工具栏中单击鼠标按钮，然后用鼠标单击帧的标题栏，即可选中帧。

双击帧的标题栏可以打开 Edit Current Frame 对话框，如图 5-12 所示。在对话框的 Left、Width、Top Side 和 Height 文本框中可以输入帧的左边位置、帧的宽度、帧的上边位置和帧的高度。对话框中部的 3 行分别对应了边界、标题栏和背景的显示与否及宽度或颜色的编辑。对话框下部的 Frame Name 文本框中可以输入帧的名字。

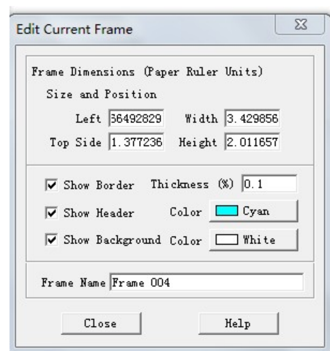


图 5-12 Edit Current Frame 对话框



5.2.2 网格和标尺的设定

利用网格可以方便地定位对象，在添加文本和几何图形时可以选择对齐到网格。利用标尺可以方便地放大、缩小对象。标尺的显示单位可以选择为厘米（cm），英寸（in），点数（pt）。或者不显示标尺。要改变网格和标尺，设定步骤如下：

（1）单击 Workspace→Ruler/Grid 命令，打开如图 5-13 所示的 Ruler/Grid 对话框。

（2）可以选择是否显示网格。

（3）若显示网格，则在网格间距（Grid Spacing）下拉列表框中指定网格间距。

（4）选择是否显示标尺。

（5）若显示标尺，则在标尺间距（Ruler）下拉列表框中选择合适的间距。

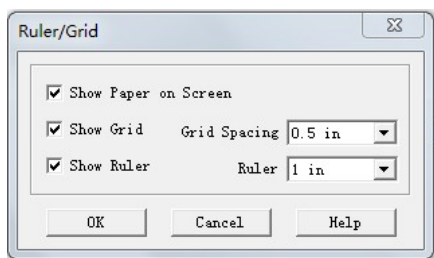


图 5-13 Ruler/Grid 对话框

5.2.3 坐标系统

Tecplot 软件中包含有多个坐标系统，但是工作纸、帧、2D 和 3D 坐标系统最为重要。4 种坐标系统的相互关系以及原点位置如图 5-14 所示。其中，2D、3D 坐标系统是根据数据集合进行控制的坐标系统，二维问题通常选 2D 坐标系统，而三维问题可选择 2D 也可以选 3D 坐标系统。帧的坐标系的长宽比例可以任意调节，但是在水平方向和垂直方向的取值范围为 0～100。

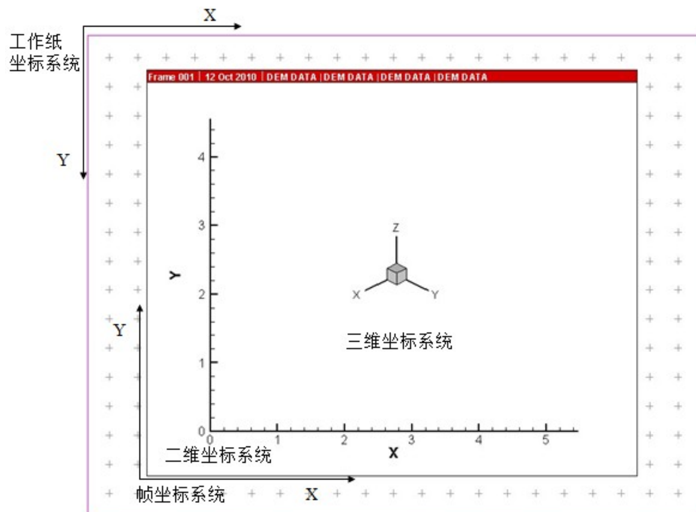


图 5-14 Tecplot 软件的坐标系统



5.3 Tecplot 软件使用技巧

下面简要介绍使用 Tecplot 软件的基本技巧。

5.3.1 XY 曲线图显示

执行 File→New Layout 命令，生成新的工作文件。执行 File→Load Datafile 命令，打开 Tecplot 软件安装目录下的 Demo\XY\y_axis2.plt 文件。在工具栏的帧模式中选择 XY Line，其图层格式有直线式、符号式、柱状式等。帧窗口中的 XY 曲线如图 5-15 所示。

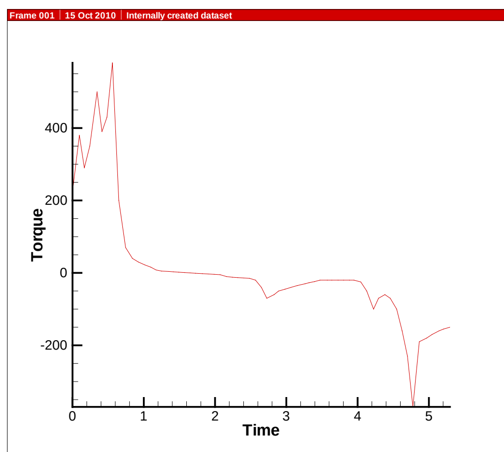


图 5-15　XY 曲线

1. 边框的编辑

在 Tecplot 软件中提供了编辑边框的功能。实现此功能可借助于 Frame 菜单下的 Edit Current Frame 选项，则会弹出一个对话框，如图 5-16 所示。此对话框主要分两个区域：一部分主要规定边框的尺寸与位置；另一部分可以对是否显示边界线、题头、背景进行设置，同时也可设置边框头的颜色等性质。

2. 关于轴线坐标的编辑

对于 XY 曲线图形，可对其轴线的坐标名进行编辑，为实现这一目标需要借助于 Plot 菜单下的 Axis 选项。在弹出的 Axis Details 对话框中选中 Title 标签，如图 5-17 所示。

此对话框中主要有三大区域：第一部分主要用来设置其显示的位置，位于轴坐标的左端、中间或右端；第二个区域用来设置坐标轴名的显示颜色、字体、尺寸等属性；第三个区域有两项：

- Use Varible Name。
- Use Text。

其中，第一项表示使用变量名，第二项用来编辑坐标轴名。

同时也可用另一种方法来编辑坐标轴名，具体方法如下：

在边框工具栏中单击Ab，再在需编辑坐标轴名的位置单击，则会弹出一个 Text Details 对话框，如图 5-18 所示。在此对话框的 Enter Text String 列表中就可以编辑想要的坐标名了。

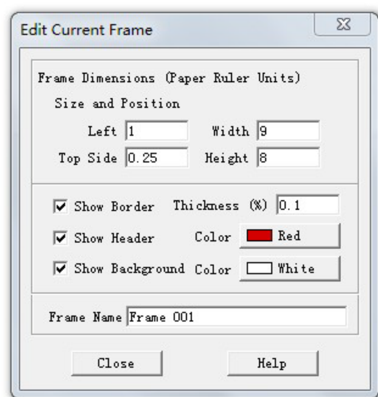


图 5-16　Edit Current Frame 对话框

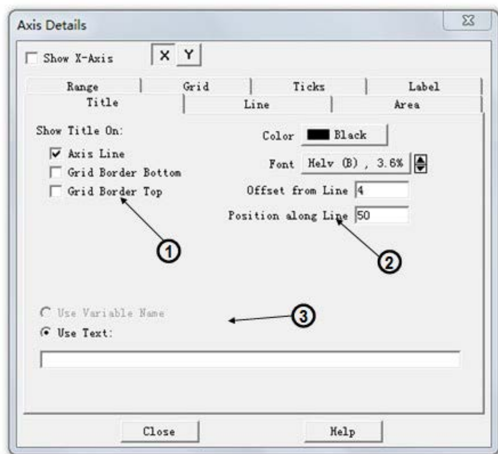


图 5-17　Axis Details 对话框

3．在 XY 曲线图形中关于 Symbol 的设置

在 XY Line 选项下单击 Mapping Style 选项，弹出 Mapping Style 对话框，在其中选择 Symbols 标签，如图 5-19 所示。在出现的列表中有诸多选项：Symb Show 用来设置 Symbol 的显示与否；Symb Shape 可用来设置 Symbol 的形状（正方形、三角形、原形）；Outline Color 用来设置 Symbol 轮廓线的颜色；Fill Mode 表示对每个 Symbol 内部填充与否，同时也可设置其填充的颜色。在设置好以上诸选项之后，再在边框工具栏 Map Layers 中选定 Symbol，就可以观察 Symbol 图了，如图 5-20 所示。

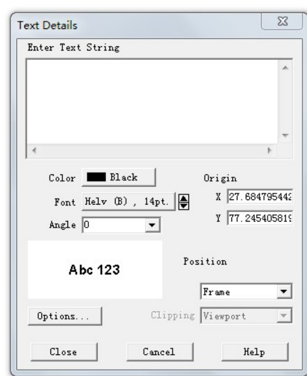


图 5-18　Text Details 对话框

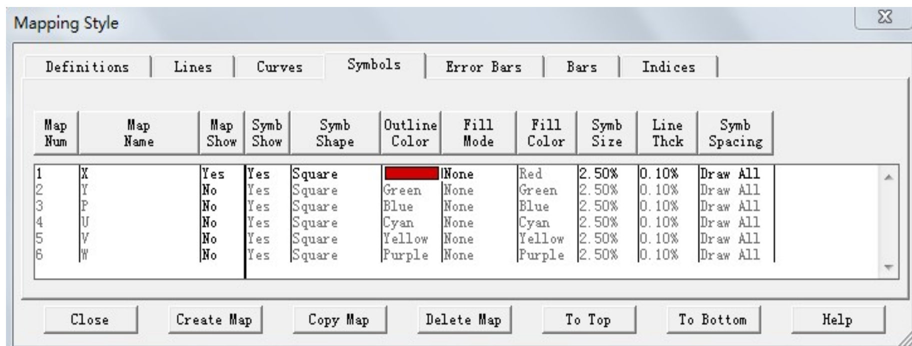


图 5-19　Mapping Style 对话框

4．XY 曲线图形的存储与输出

在绘制完图形后，需要对此图形进行必要的存储以便以后做修改。这时需要保存.lay 文件。打开“文件”菜单，或者用 save file 或者用 save file as 命令。如果正在读一图形，选择前者就会取代先前的保存，而后者则需要输入一个新的名字来保存当前的图形。输入新名字

之后还需要为数据集再定义一个名字。以后若想读入一幅图，则只需单击“文件”菜单中的 Open Layout 命令，而不必打开数据文件！

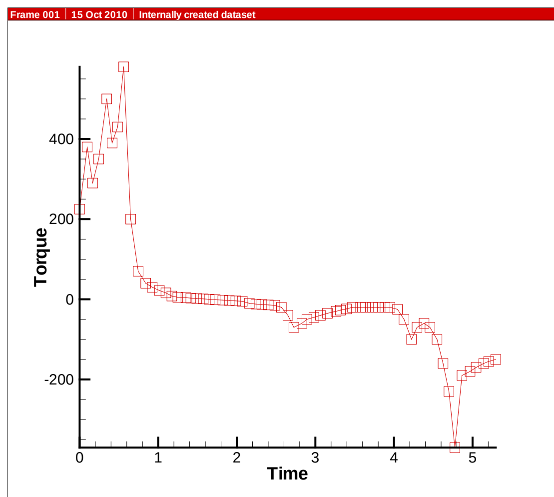


图 5-20　Symbol 图

若想把所绘制的 Tecplot 软件图输出到 Word 文档中，则需利用到 Edit 菜单。单击菜单中的 Copy Layout to Clipboard 命令，然后打开 Word 文档，在其中想存储的位置单击鼠标右键，粘贴至此，然后还可以适当地调整图形的大小和位置等属性。

5.3.2　二维视图显示

执行 File→New Layout 命令，生成新的工作文件。执行 File→Load Datafile 命令，打开 Tecplot 软件安装目录下的 Demo\2D\nozzle.plt 文件。帧窗口中的网格曲线如图 5-21 所示。

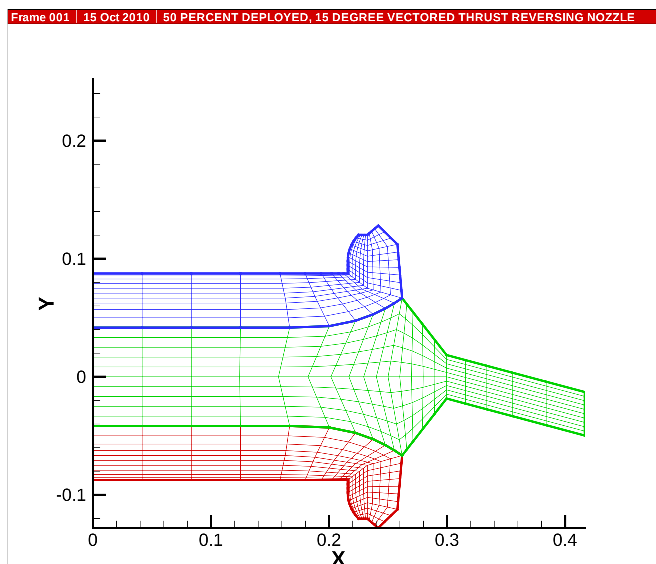


图 5-21　网格曲线



1．显示云图

在 Zone 选项组中取消选中 Mesh 复选框，选中 Contour 复选框，弹出如图 5-22 所示的 Contour Details 对话框，选择 R/RFR，即可显示云图，如图 5-23 所示。

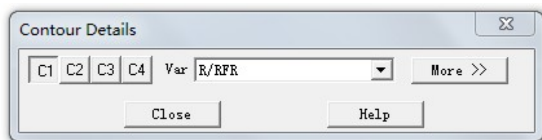


图 5-22　Contour Details 对话框

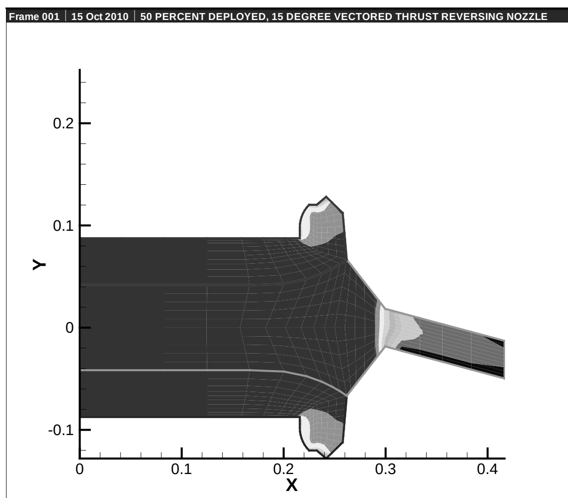


图 5-23　云图

若想在图中添加标尺，则可以单击 Contour Details 对话框中的 More >> 按钮，弹出对话框如图 5-24 所示。选择对话框中 Legend 标签，并勾选 Show Contour Legend 复选框。这时的帧窗口中出现云图标尺，方便读书，如图 5-25 所示。

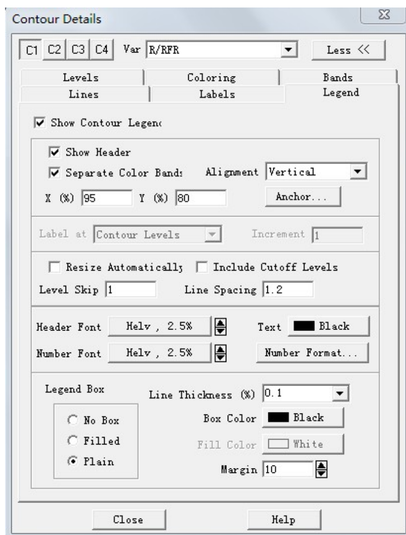


图 5-24　Contour Details 对话框

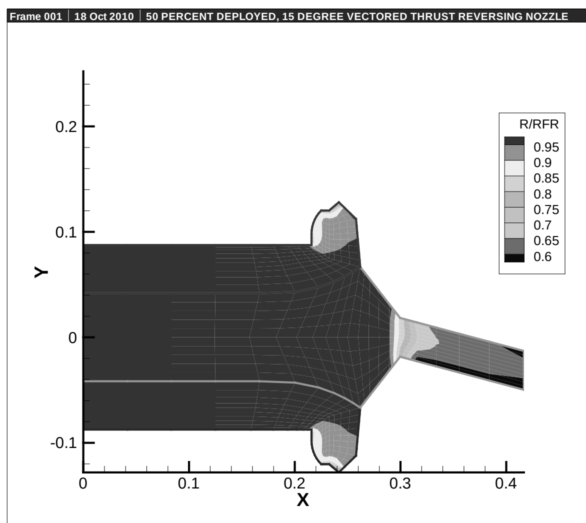


图 5-25　带标尺的云图

2．显示等值线图

在云图的基础上可以建立等值线图，单击工具栏中的 Zone Style... 按钮，弹出 Zone Style 对话框，如图 5-26 所示。选择需要显示等值线的区域，单击对话框中 Contour Type 按钮，弹出下拉列表，选择 Both Lines&Flood，即同时显示等值线与云图，如图 5-27 所示。

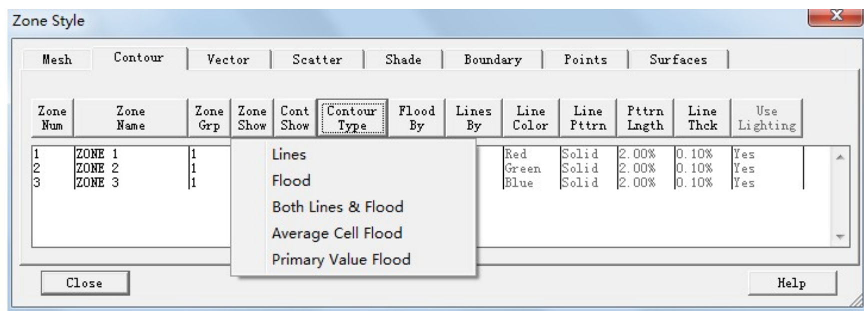


图 5-26　Zone Style 对话框

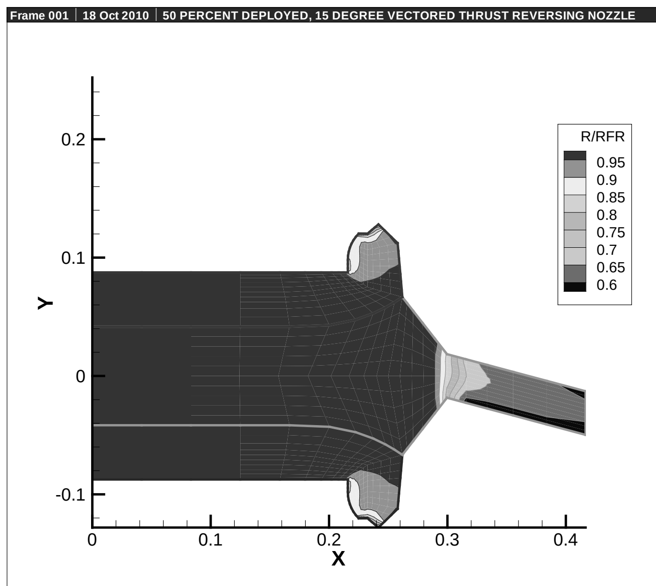


图 5-27　等值线与云图

单击 Zone Style 对话框中 Line Colour 按钮，可以设置等值线颜色。

单击 Zone Style 对话框中 Line Pttrn 按钮，可以选择等值线的类型，有 Solid（实线）、Dashed（虚线）、DashDot（点画线）、Dotted（点线）、LongDash（长虚线）和 DashDotDot（点画点画线）等。

单击 Zone Style 对话框中 Line Thck 按钮，可以设置等值线的线宽。

如果需要在等值线上标注数据，则可以打开 Contour Details 对话框，选择 Lables 选项，勾选 Show Lables。还可以通过 Font 来调节显示的数字大小。加注数据的等值线图如图 5-28 所示。



3．显示速度矢量图

取消选择工具栏中的 Contour，选择 Vector 复选框，则弹出 Select Variables 对话框，如图 5-29 所示。U 与 V 都选择 R/RFR，单击 OK 按钮。

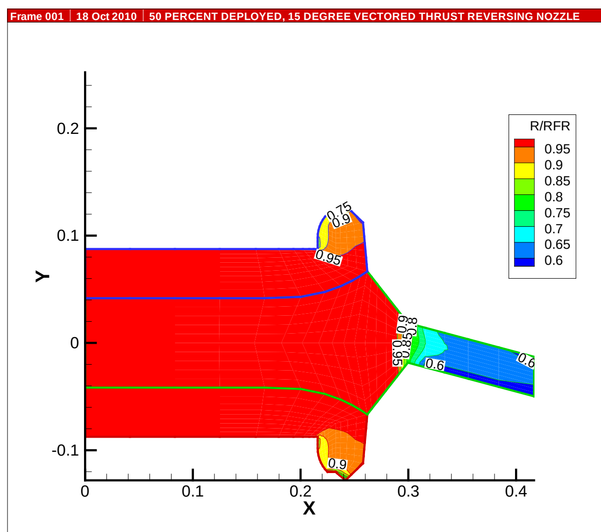


图 5-28　加注数据的等值线图

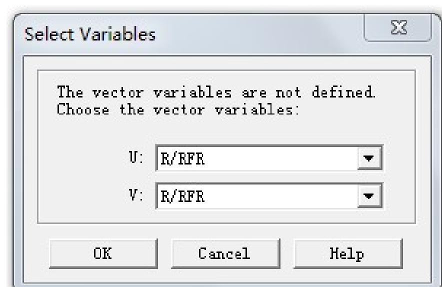


图 5-29　Select Variables 对话框

此时，帧窗口中的速度矢量图如图 5-30 所示。为了反应速度大小，应对其进行着色。单击工具栏中 Zone Style 按钮，在 Zone Style 对话框中选择 Line Colour，在弹出的颜色选择对话框中选择多色（Multi），然后单击 Close 按钮。如图 5-31 所示，这时的速度矢量已经被着色，可以清晰地辨别出各点速度的大小。

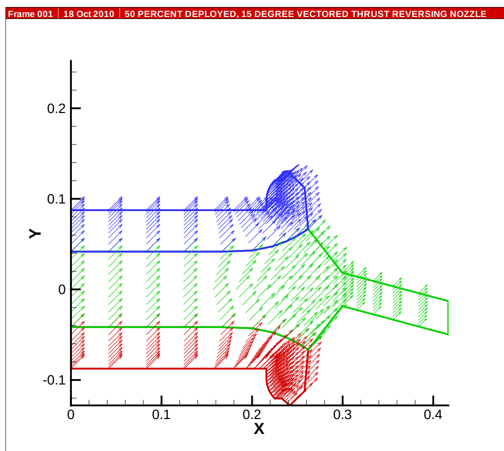


图 5-30　速度矢量图

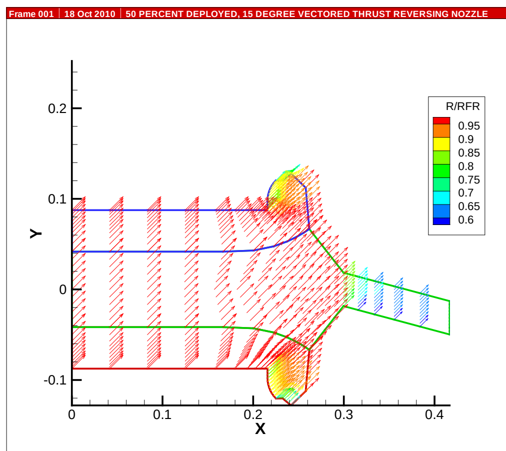


图 5-31　着色后的速度矢量图

在速度矢量图上还可以绘制流动迹线。单击工具栏中的按钮，然后在速度矢量图中上下拖动鼠标光标，就可以绘制迹线图，如图 5-32 所示。



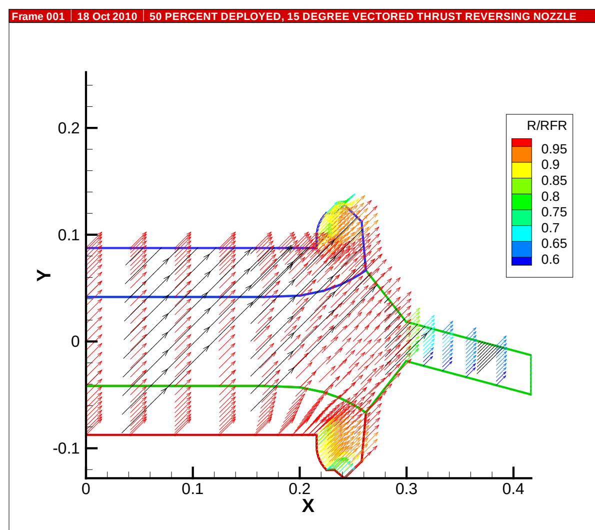


图 5-32　迹线图

5.3.3　三维视图显示

对于三维数据，Tecplot 软件利用围墙将平面分成多个小格，然后进行绘图。围墙面的数据可以是 IJ 有序数据，也可以是 I、J、K 平面和 IJK 数据。围墙面的位置要求首先绘制出底面数据，然后绘制出垂直于底面的数据作为围墙，并把面分割成小格。

执行 File→New Layout 命令，生成新的工作文件。执行 File→Load Datafile 命令，打开 Tecplot 软件安装目录下的 Demo\3D_Volume\nozzle.plt 文件。在弹出的 Select Initial Plot 对话框中选择 Intitial Plot 为 3D Cartesian，如图 5-33 所示。帧窗口中的网格曲线如图 5-34 所示。

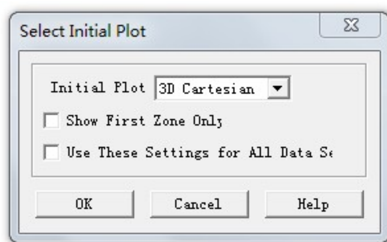


图 5-33　Select Initial Plot 对话框

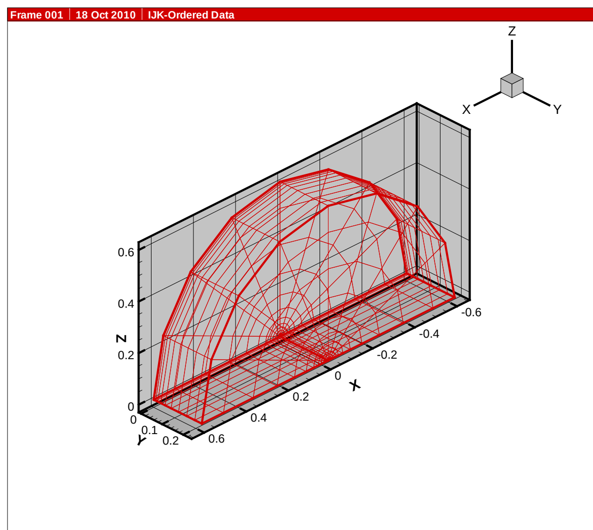


图 5-34　网格曲线



取消工具栏中 Mesh 选项，勾选 Contour 复选框，并在弹出的 Contour Details 对话框中选择 Var 为 E。单击 Close 按钮，关闭 Contour Details 对话框，此时的云图如图 5−35 所示。

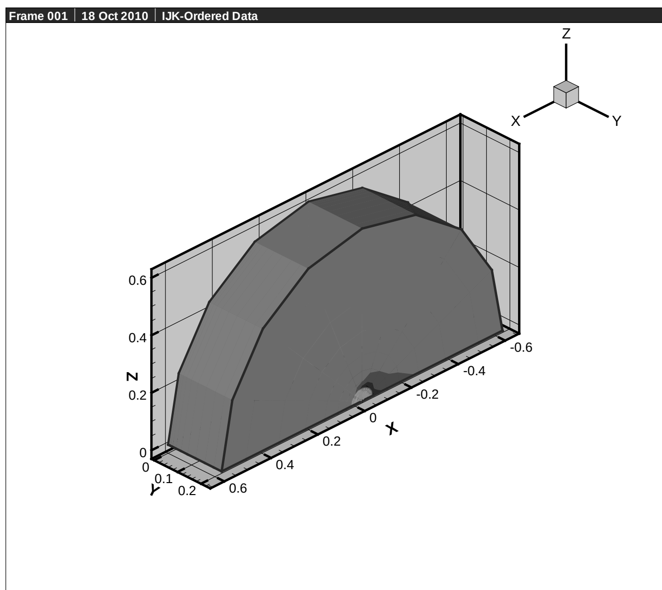


图 5−35　三维云图

单击 Zone Style 按钮，在弹出的如图 5−36 所示的 Zone Style 对话框中选择 Surfaces 标签，然后单击 Surface To Plot 按钮，在下拉列表中选择 I-J-K-planes，此时在 X 方向生成了围墙面，如图 5−37 所示。

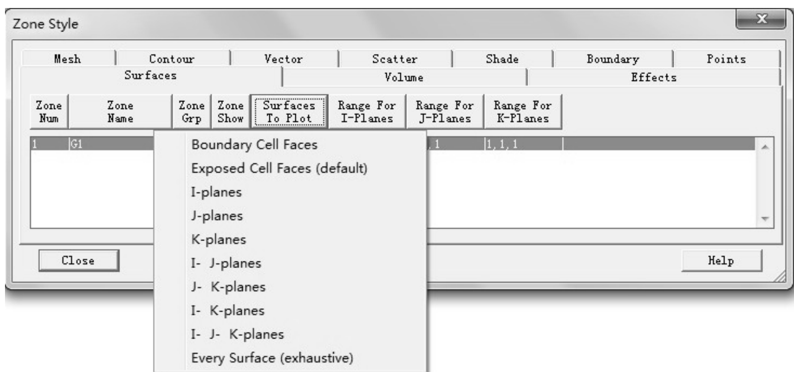


图 5−36　Zone Style 对话框

接着可以调节围墙面的范围。在 Zone Style 对话框的 Surfaces 选项卡中，单击 Range For I-Planes 按钮，在弹出的如图 5−38 所示的 Enter Range 对话框中，将 Skip 文本框改为 5，单击 OK 按钮。同理，将 Range For J-Planes 中的 Skip 文本框改为 5，将 Range For K-Planes 中的 Skip 文本框改为 Mx。还可以根据时间情况调节 Rang For I-Planes、J-Planes、K-Planes 中的 Begin、End 和 Skip。最后调节工具栏中的按钮，将图形调节至合适视图，如图 5−39 所示。

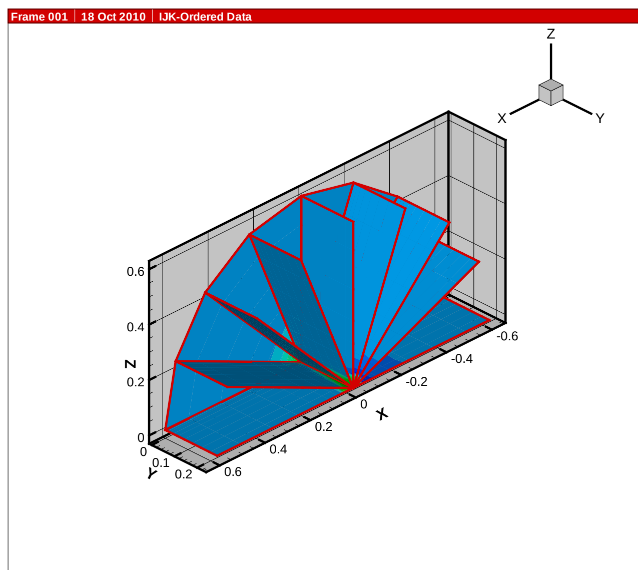


图 5-37　X 方向的围墙面

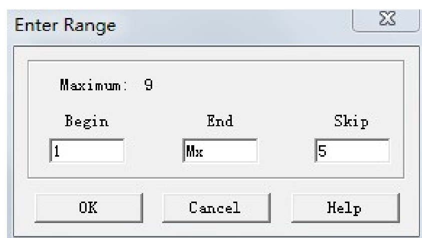


图 5-38　Enter Range 对话框

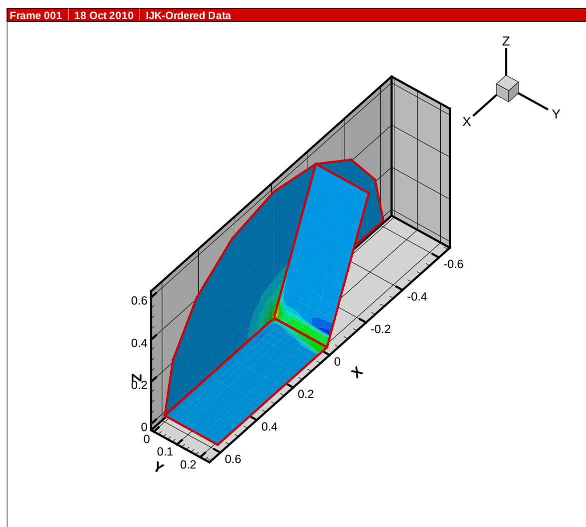


图 5-39　围墙效果图

5.4　Tecplot 软件的数据格式

下面对 Tecplot 软件中的数据格式进行简要介绍。

5.4.1　Tecplot 软件的数据层次

Tecplot 软件中的数据分为两个层次，如图 5-40 所示。

Tecplot 软件中最高等级的数据被称为一个数据系列。它包括一个或者多个数据区域、



数据块等。区域为数据结构中的第二等级，可以从数据文件中读入或者利用 Tecplot 软件进行创建。在运行 Tecplot 软件时，每当读入数据文件，或者创建区域时系统便会把数据加入到活动帧的数据结构中去。同一个数据系列可以和多个帧连接，如图 5-41 所示。

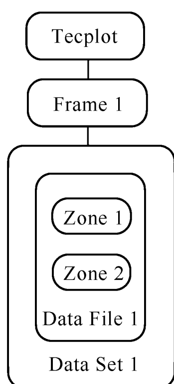


图 5-40　Tecplot 软件的数据结构示意图

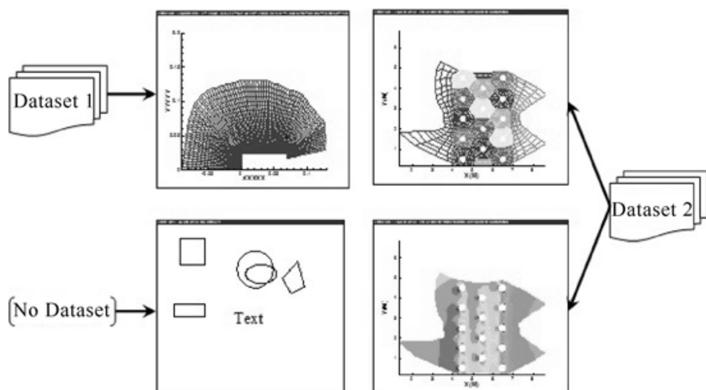


图 5-41　多帧数据连接方式

如果读入的数据文件超过一个，Tecplot 软件会自动将数据分组为一个数据系列，而且对每个数据点都包含有相同的变量参数，但是并不要求所有的数据文件的参数顺序都相同。Tecplot 软件中应用相同数据系列帧的标题颜色相同。图 5-42 给出了一个复杂的 Tecplot 软件的数据文件结构。图中帧 1 和帧 2 利用数据系列 1，由一个包含有 3 个区域的数据文件构成；帧 3 利用数据系列 2，由一个包含两个数据区域的数据文件和一个包含 3 个数据区域的数据文件组成；帧 4 利用数据系列 3，由一个包含两个区域的一个数据文件构成。

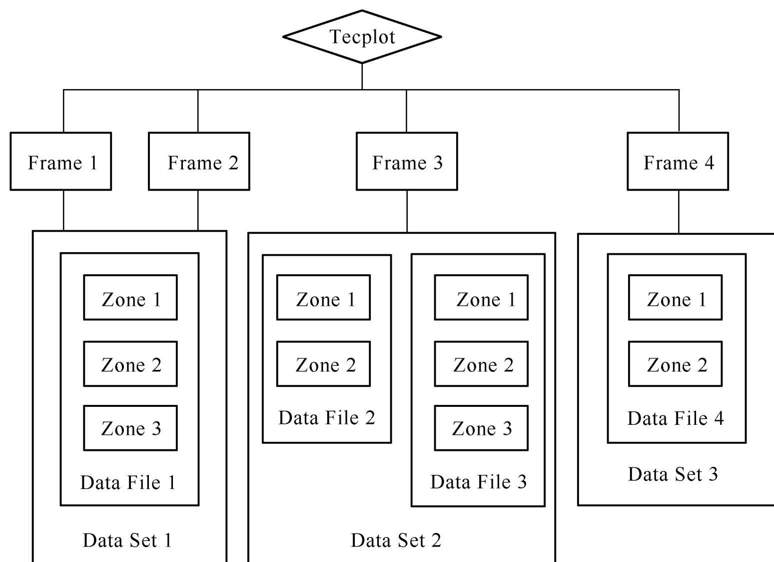


图 5-42　复杂的 Tecplot 软件的数据文件结构

5.4.2 多数据区域

多数据区域可以方便地绘制复杂结构，或者细分结构图标，也可以用来表示不同时间步的数据，或者不同测量方法的数据。图 5-43 为一个利用多区域数据的范例。

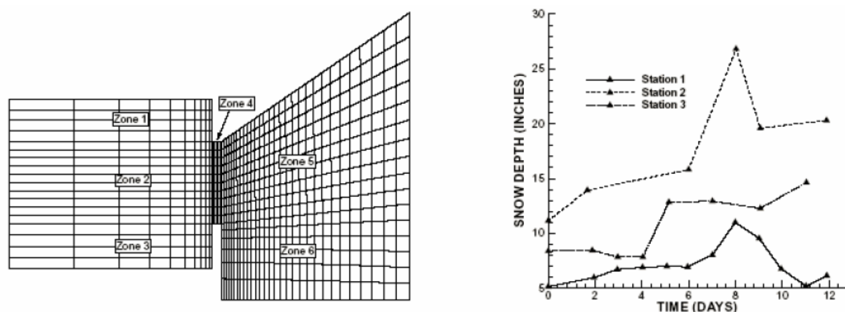


图 5-43 多区域数据

5.4.3 数据区域中的数据结构

Tecplot 软件可以使用两种数据类型：有序数据和有限元数据。

（1）有序数据 有序数据是一列按照逻辑保存于一维、二维或者三维数据组中。在 Tecplot 软件中应用 I、J、K 表示数据组维数下标。最常见的数据形式如下。

1）I 序列：I 维数据组点数大于 1 并且 JK 维数据点数为 1。I 维数据点数为整个数据组数据点数。

2）IJ 序列：两维数组 IJ 的数据点数大于 1 并且 K 维数据点数为 1，数据点数为 IJ 维数据点的乘积。

3）IJK 序列：三维数据组中 IJK 维数据点个数大于 1，数据点个数为 IJK 数据点个数的乘积。

（2）有限元数据（finite-elementary） 或称 FE 数据是一种把数据点作为 2D 或者 3D 空间中的点按照规定连接形成单元或者网格的数据结构方法。有限元数据可以分为两类。

1）FE-表面：用系列三角形或者四边形定义 2D 场或者 3D 面。

2）FE-体：用系列四面体或者块单元定义 3D 场。

对于任何一种类型，理论上来说没有数据点个数的极限，但是由于计算机内存容量的限制实际上是有极限的。

5.5 Tecplot 软件对 FLUENT 软件的数据进行后处理

5.5.1 Tecplot 软件读取 FLUENT 软件的文件数据

Tecplot 软件可以直接读取 12 种软件生成的数据文件。执行 File→Import 命令，弹出数据加载对话框，如图 5-44 所示。

其中，常用软件的介绍如下。



- CGNS：计算流体力学通用注释系统格式（Computational Fluid Dynamics General Notation System）。
- DEM：数字评价图格式（Digital Elevation Map）。
- DXF：数字交换格式（Digital eXchange Format）。
- Excel 表（Windows only）。
- FLUENT（.cas and .dat）。
- Gridgen 格式。
- HDF：层级数据格式（Hierarchical Data Format）。
- Image 文件。
- PLOT3D 文件。
- Text spreadsheet 文件：文字表单格式。

下面具体介绍读取 FLUENT 文件的过程。选择 Select Import Format 对话框中的 Fluent Data Loader，单击 OK 按钮，弹出 Fluent Data Loader 对话框，如图 5-45 所示。

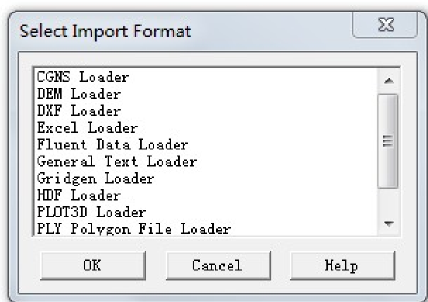


图 5-44　数据加载对话框

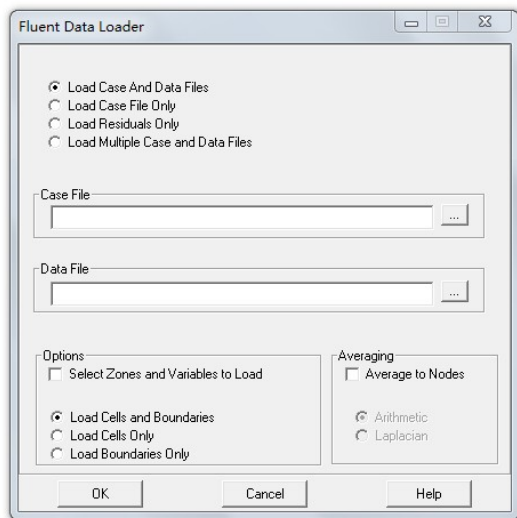


图 5-45　Fluent Data Loader 对话框

在对话框上部有 4 个选项。

- Load Case And Data Files：加载网格和数据文件，读入*.cas 和*.dat 文件。Tecplot 软件会读入所有的变量并且加入 Tecplot 软件的数据系列。
- Load Case File Only：只加载网格，只读入 FLUENT*.cas 文件。
- Load Residuals Only：只加载残差：只加载残差数据（收敛记录）。
- Load Multiple Case and Data Files：加载多个工程和数据文件。

Options 选项组提供了辅助选项，有加载单元和边界，只加载数据和只加载边界之分。在导入 FLUENT 软件数据的时候，通常选择 Load Case and Data Files 单选按钮，Options 选项组选择 Load Cells and Boundaries（加载单元和边界），然后在 Case File 和 Data File 文本框中导入需要加载的文件。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
第 5 章 Tecplot 软件使用入门
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254



对于某些需要特殊分析的数据，也可以从 FLUENT 中先导出为 Tecplot 软件的数据。在 FLUENT 软件下，执行 File→Export 命令，弹出 Export 对话框，如图 5−46 所示。

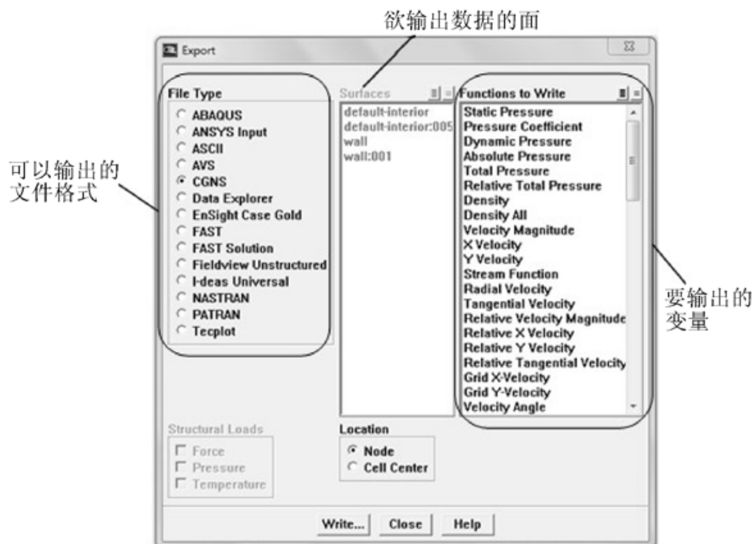


图 5−46　Export 对话框

选择好相应的面及变量以后，单击 Write 按钮，即可以把对应的数据输出为 Tecplot 软件格式的文件。在 FLUENT 完成文件输出之后，可在 Tecplot 软件中通过 File→Load Data File(s)命令，读取刚输出的数据文件来进行处理。

5.5.2　Tecplot 软件后处理实例——三维弯管水流速度场模拟

1．实例概述

如图 5−47 所示的三维弯管，水流以 0.1m/s 的速度从入口进入。下面用 FLUENT 6.3 和 Tecpolt 软件共同模拟该管道内的速度场。

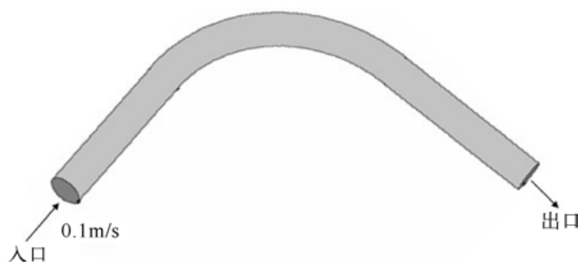


图 5−47　三维弯管几何模型

2．模型的建立

01 单击 Geometry →Volume →Create Real Torus ，弹出 Create Real Torus 面板，如图 5−48 所示。在 Radius1 和 Radius2 中分别输入 10 和 1，保持 Center Axis 为 Z 轴，单击 Apply 按钮，出现三维圆环，如图 5−49 所示。



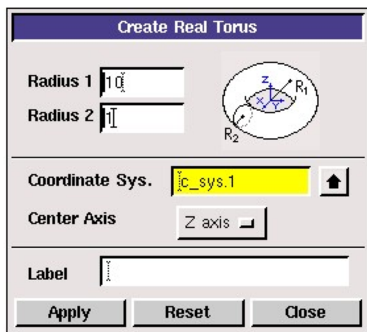


图 5-48　Create Real Torus 面板

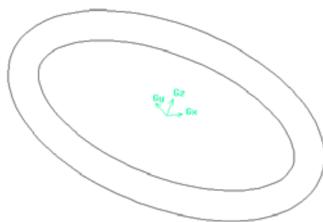


图 5-49　三维圆环

02 建立分割体。单击 Geometry →Volume →Create Real Brick ，在弹出的 Create Real Brick 对话框的 Width、Depth、Height 文本框中分别输入 30，单击 Apply 按钮，生成分割立方体。

03 移动分割体。单击 Geometry →Volume →Move/Copy Volumes ，在 Move/Copy Volumes 面板中选择新建立的立方体，X 轴方向移动–15，Y 轴方向移动–15，Z 轴保持 0，单击 Apply 按钮，如图 5-50 所示。

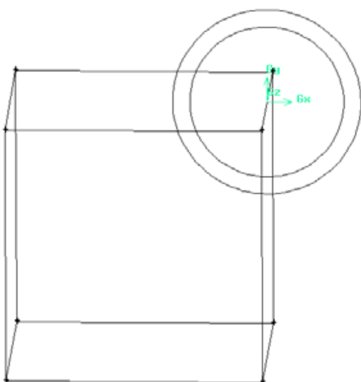


图 5-50　分割体与圆环

04 单击 Geometry →Volume →Split Volume ，弹出 Split Volume 面板，如图 5-51 所示。第一行的 Volume 选择圆环，第二行的 Volume 选择立方体，单击 Apply 按钮，即将圆环分割成 1/4 和 3/4 部分，如图 5-52 所示。

05 擦除多余几何体。单击 Geometry →Volume →Delete Volume ，选中需要擦除的几何体积，单击 Apply 按钮，即得到管道拐角处的几何体，如图 5-53 所示。

06 建立管道直道。单击 Geometry →Volume →Create Real Cylinder ，在 Create Real Cylinder 面板中输入 Height：10；Radius1：1；Radius2：1；Axis Location 选择 Positive Y，单击 Apply 按钮，生成一个圆柱体。同理，在 X 轴方向上生成一个同样尺寸的圆柱体。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
第 5 章 Tecplot 软件使用入门
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254



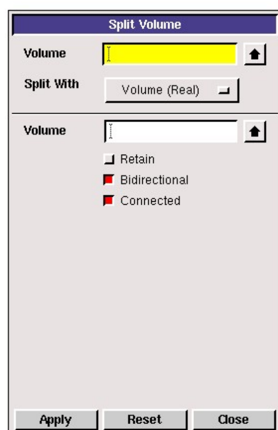


图 5-51　Split Volume 面板

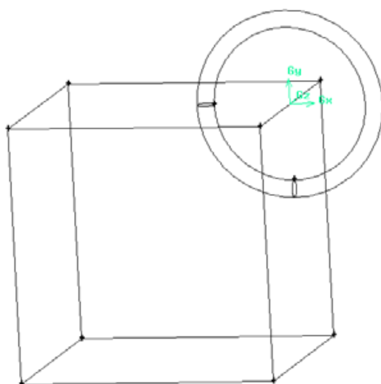


图 5-52　分割后的几何体

07 移动圆柱体。单击 Geometry →Volume →Move/Copy Volumes，在 Move/Copy Volumes 面板中选择 Y 轴方向的圆柱体，沿 X 轴方向移动–10；选择 X 轴方向上的圆柱体，沿 Y 轴方向移动–10，单击 Apply 按钮，即生成管道几何体模型，如图 5-54 所示。

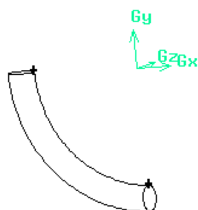


图 5-53　管道拐角处的几何体

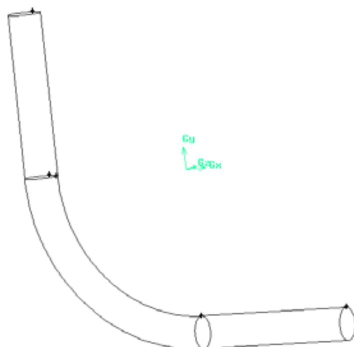


图 5-54　管道几何体模型

08 将生成的三段几何体合并。单击 Geometry →Volume →Unit Real Volumes，即将三段几何体合成为一体。

3．网格的划分

01 单击 Mesh →Face →Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选中直管的截面，选择 Quad、Pave 的划分方式，Interval Size 输入 0.15，单击 Apply 按钮，完成面网格的划分，如图 5-55 所示。

02 单击 Mesh →Volume →Mesh Volumes，Mesh Volumes 面板，选中几何体，选择 Hex/Wedge、Cooper 的划分方式，Interval Size 输入 0.5，单击 Apply 按钮，完成体网格的划分，如图 5-56 所示。

03 单击 Zones →Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中直管一边的截面定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in；将另一边的截面定义为自



由出口（OUTFLOW），名称为 out；选择剩下的壁面定义为 WALL。

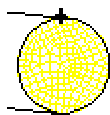


图 5-55　面网格的划分

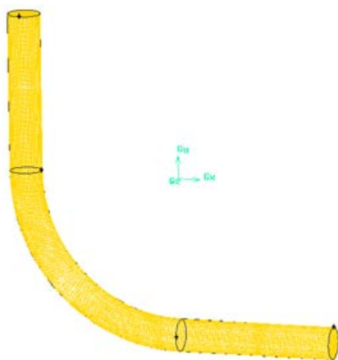


图 5-56　体网格的划分

04 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 pipe.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 3d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 pipe.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Grid→Scale...命令，将尺寸变为 dm。

04 执行 Define→Models→Solver…命令，弹出 Solver 对话框，保持默认值，单击 OK 按钮。

05 执行 Define→Materials 命令，单击 Fluent Database 按钮，在 Fluent Database Materials 下拉列表框中选择 water-liquid[h2o<1>]，如图 5-57 所示。顺序单击 Copy、Change/Create 和 Close 按钮，完成对材料的定义。

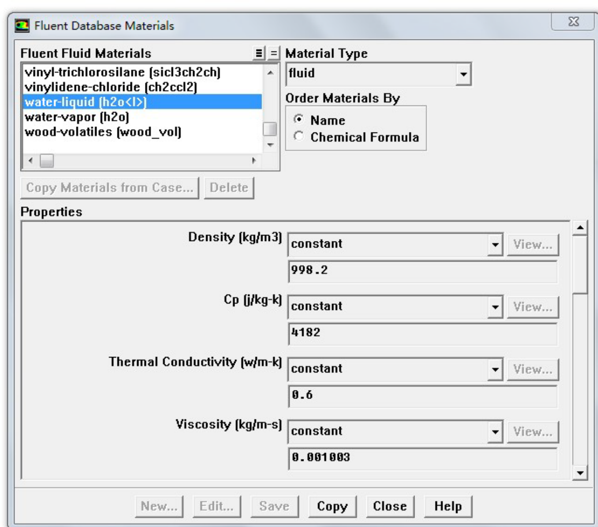


图 5-57　Fluent Database Materials 对话框

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
第 5 章 Tecplot 软件使用入门
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

06 执行 Define→Operating Conditions…命令，保持默认值，单击 OK 按钮。

07 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。在列表中选择 fluid，在弹出的 fluid 面板中选择 Material 为 water-liquid，单击 OK 按钮。在列表中选择 in，其类型（Type）为 velocity-inlet，单击 Set…按钮，在 Velocity Magnitude 文本框中输入 0.1，单击 OK 按钮。

08 执行 Solve→Control→Solution…命令，保持默认值，单击 OK 按钮。

09 执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 in，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

10 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，收敛精度均为 0.001，单击 OK 按钮。

11 执行 Solve→Iterate…命令，设置 Number of Iteration 为 100，单击 Iterate 按钮开始解算。

12 执行 Display→Contours...命令，在 Contours of 下拉列表框中选择 Velocity，不勾选 Filled，单击 Display 按钮，出现管道速度轮廓图，如图 5−58 所示。再在 Surface 列表中选择 out，显示出口处的速度轮廓图，如图 5−59 所示。

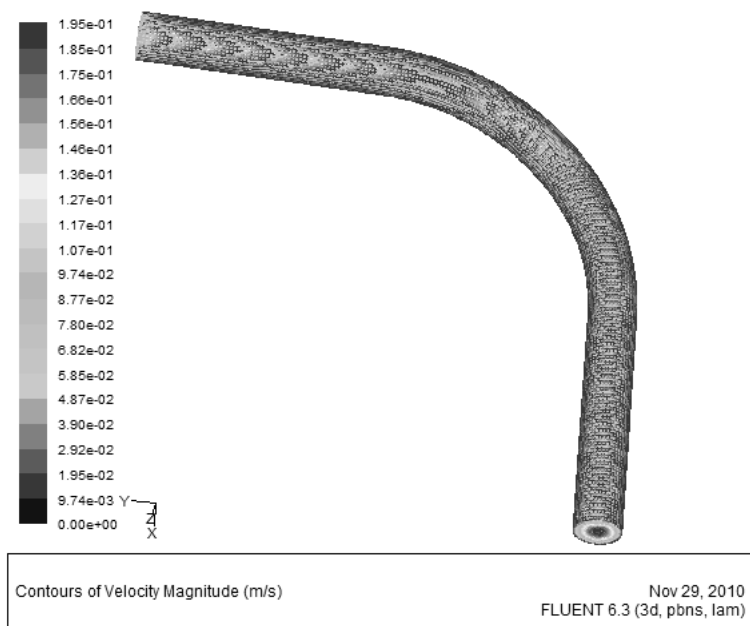


图 5−58　管道速度轮廓图

13 执行 Display→Vectors…命令，在 Surfaces 列表中选择 out，单击 Display 按钮，即得到出口处的速度矢量图，如图 5−60 所示。

14 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 pipe.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 pipe.dat。



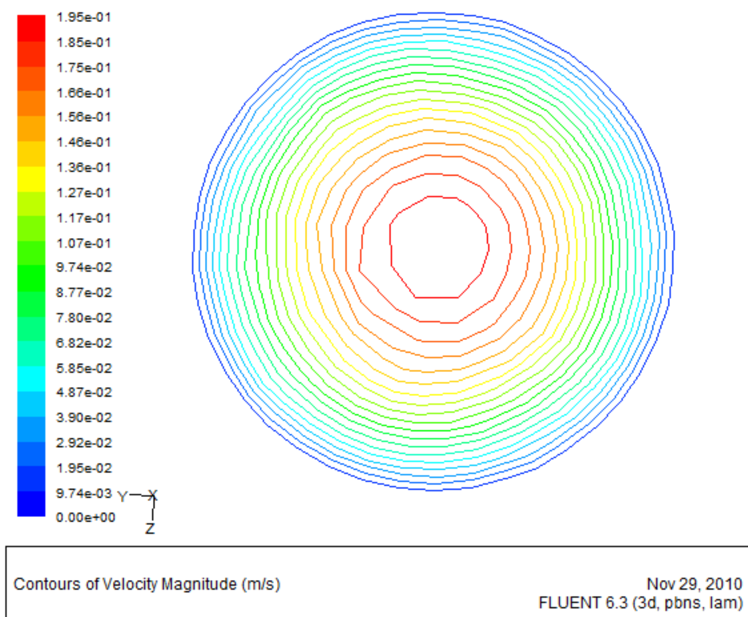


图 5-59　出口处的速度轮廓图

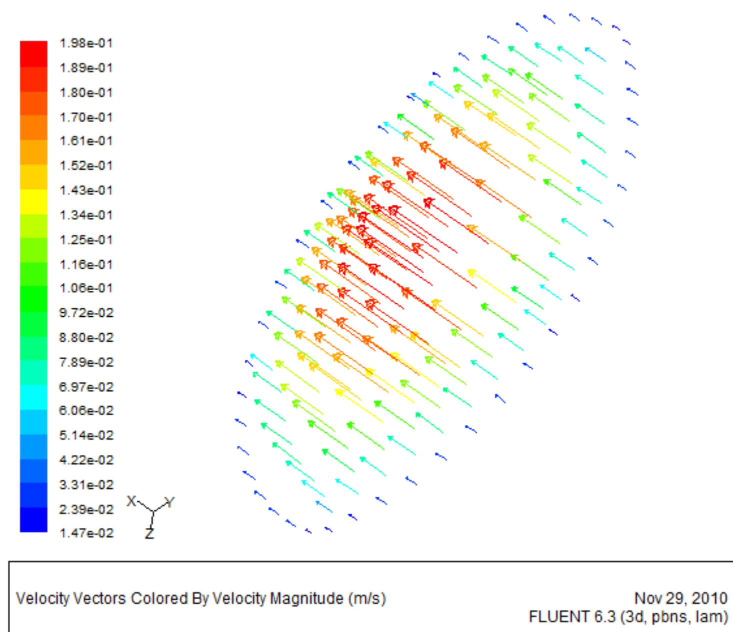


图 5-60　出口处的速度矢量图

5．Tecplot 软件的后处理

01 单击 File→Export 命令，出现 Export 对话框，如图 5-61 所示。在 File Type 选项组中选择 Tecplot，Surface 选项组全选，Functions to Write 选项组中选择 Velocity Magnitude、X Velocity、Y Velocity、Z Velocity、Axial Velocity，单击 Write…按钮，保存为

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
第 5 章 Tecplot 软件使用入门
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

pipe.plt。

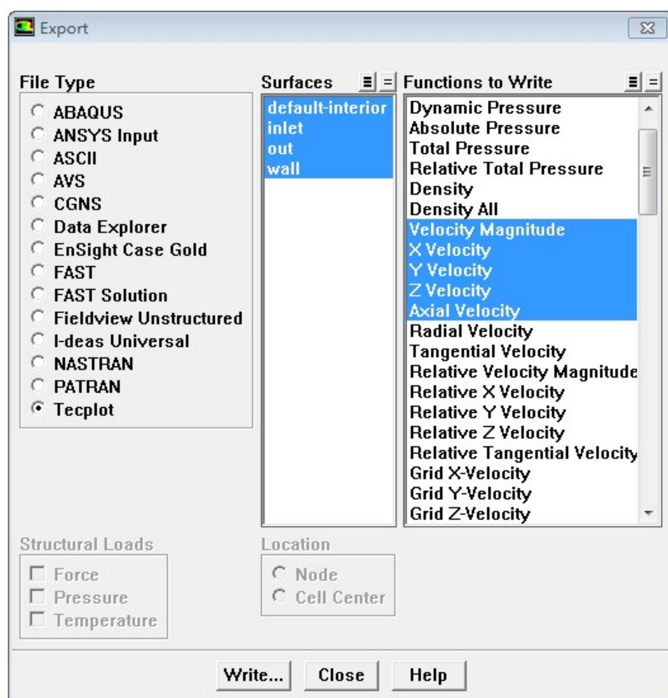


图 5-61　Fluent 软件中的 Export 对话框

02 双击 Tecplot 软件的快捷方式打开 Tecplot 软件。执行 File→Load Data File 命令导入 pipe.plt。

03 数据导入后选择 3D 的显示方式。在 Zone 选项组中选择 Vector，弹出 Select Variables 对话框，如图 5-62 所示。在 U、V、W 中分别选择 X、Y、Z，单击 OK 按钮，就出现管道的三维速度矢量图，如图 5-63 所示。

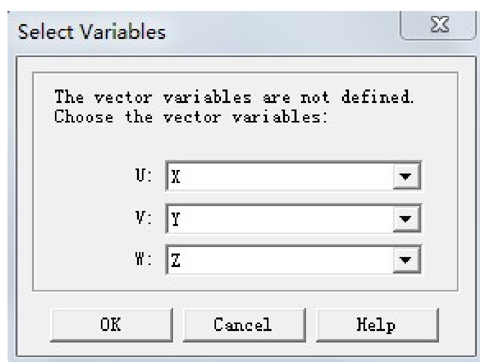


图 5-62　Select Variables 对话框

04 执行 File→Export 命令，打开如图 5-64 所示的 Export 对话框。在 Export Format 下拉列表框中选择 TIFF 格式，单击 OK 按钮，保存图形文件 pipe.tif。



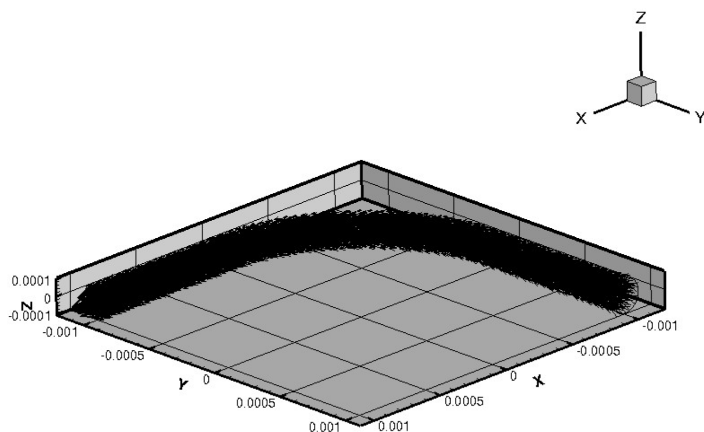


图 5-63　管道的三维速度矢量图

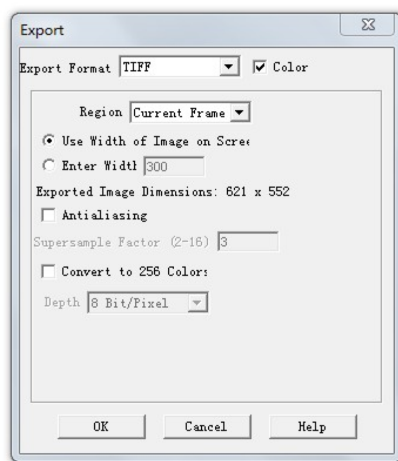


图 5-64　Tecplot 软件中的 Export 对话框



第 6 章 UDF 使用简介

UDF（User-Defined Function）指用户定义函数。本章主要介绍了 UDF 的基础知识、UDF 宏以及 UDF 的解释和编译，重点介绍了 UDF 宏和常用宏的功能，使读者初步了解 UDF 的基本理论和使用方法，并通过实例操作帮助读者掌握 UDF 的基本用法，为实际应用打下基础。

6.1 UDF 基础

UDF 概念出现在 MySQL、InterBase、Firebird 等软件中，它是用户自编的程序，可以动态地连接到 FLUENT 软件中的求解器上来提高求解器性能。

6.1.1 UDF 概述

用户自定义函数用 C 语言编写，使用 DEFINE 宏来定义。UDF 中可使用标准 C 语言的库函数，也可使用 FLUENT 公司提供的预定义宏，通过这些预定义宏，可以获得 FLUENT 软件中的求解器得到的数据。

UDF 使用时可以被当做解释函数或编译函数。解释函数在运行时读入并解释，而编译 UDF 则在编译时被嵌入共享库中并与 FLUENT 软件连接。解释 UDF 用起来简单，但是有源代码和速度方面的限制不足。编译 UDF 执行起来较快，也没有源代码限制，但设置和使用较为麻烦。

在 FLUENT 软件中 UDF 可以完成各种不同的任务。如果它们在 udf.h 文件中没有被定义为 void，那么它们可以返回一个值。如果它们没有返回一个值，则还可以修改一个哑元，或是修改一个没有被作为哑元传递的变量，或者借助算例文件和数据文件执行输入、输出任务。

简要介绍 UDF 的一些功能：

- 定制边界条件、定义材料属性、定义表面和体积反应率、定义 FLUENT 软件输运方程中的源项、用户自定义标量输运方程（UDS）中的源项扩散率函数等。
- 在每次迭代的基础上调节计算值。
- 方案的初始化。
- （需要时）UDF 的异步执行。
- 后处理功能的改善。
- FLUENT 软件模型的改进（如离散项模型、多项混合物模型、离散发射辐射模型）。

UDF 的源文件只能以扩展名“.c”保存。通常源文件只有一个 UDF 函数，但是也允许在



一个文件中包含多个前后相连的 UDF 函数。源文件在 FLUENT 软件中既可以被解释，也可以被编译。对于解释型 UDF，源文件直接被加载和解释；而对于编译型 UDF，首先要建立一个共享的目标模块库，然后将它加载到 FLUENT 软件中。一旦解释或编译了 UDF，相应的 UDF 名字将在 FLUENT 软件窗口中出现，并在相应的对话框中通过选择这个函数将其连接到一个求解器中。

6.1.2　FLUENT 软件中的网格拓扑

网络拓扑结构指用传输媒体互连各种设备的物理布局。流场的网格是由大量控制体或单元组成的，每个单元都是由一组网格点（或节点）、一个单元中心和包围这个单元的面所定义的。表 6−1 是对网格拓扑术语的解释。

（如图 6−1 和图 6−2 所示分别为简单的二维和三维网格。）

表 6−1　网格拓扑术语

单元（cell）	区域被分割成的控制容积
单元中心（cell center）	FLUENT 软件中场数据存储的地方
面（face）	单元（2D 或 3D）的边界
边（edge）	面（3D）的边界
节点（node）	网格点
单元线索（cell thread）	在其中分配了材料数据和源项的单元组
面线索（face thread）	在其中分配了边界数据的面组
节点线索（node thread）	节点组
区域（domain）	由网格定义的所有节点、面和单元线索的组合

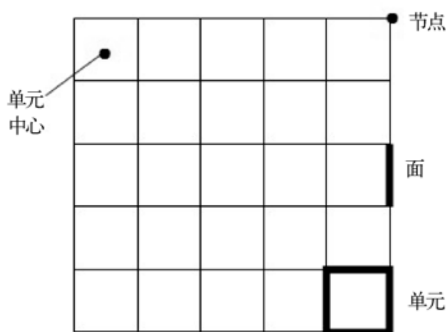


图 6−1　简单的二维网格

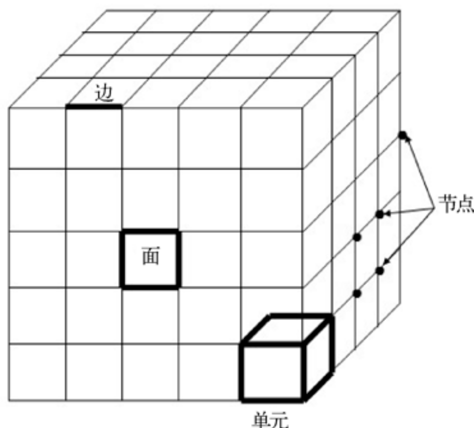


图 6−2　简单三维网格

单元和单元面组成代表流场各个部分区域（进口、出口、壁面、流动区域等）。一个面围住的是一个还是两个单元（c0 和 c1）取决于它是一个边界面还是一个内部面。如果是边界面，那么仅有 c0 存在（对于一个边界面，不定义 c1）；如果是内部面，则需要同时定义

c0 和 c1 单元。一个面两侧的单元可以属于同一个单元线程，也可以属于另一个单元线程。

6.1.3 FLUENT 软件中的数据类型

除了标准的 C 语言数据类型（如 float、int 等）可用于 UDF 中定义数据外，还有几个 FLUENT 软件指定的与求解器数据相关的数据类型。这些数据类型描述了 FLUENT 软件中定义的网格的计算单位。使用这些数据类型定义的变量既有代表性地补充了 UDF 宏的自变量，也补充了其他专门的访问 FLUENT 软件中的求解器数据的函数。

一些经常使用的 FLUENT 软件中的数据类型如下：

- cell_t 是线索（thread）内单元标识符的数据类型。它是一个识别给定线索内单元的整数下标。
- face_t 是线索内面标识符的数据类型。它是一个识别给定线索内面的整数下标。
- Thread 数据类型是 FLUENT 软件中的数据结构。它充当了一个与它描述的单元或面的组合相关的数据容器。
- Node 数据类型是 FLUENT 软件中的数据结构。它充当了一个与单元或面的拐角相关的数据容器。
- Domain 数据类型代表了 FLUENT 软件中最高水平的数据结构。它充当了一个与网格中所有节点、面和单元线索组合相关的数据容器。

6.2 UDF 宏

6.2.1 UDF 中访问 FLUENT 软件中的变量的宏

FLUENT 软件提供了一系列预定义函数来从求解器中读写数据。这些函数以宏的形式存放在代码中。本节所列出的宏是定义在扩展名为.h 文件里的，如 mem.h、metric.h 和 dpm.h。在 udf.h 文件中包含了宏的定义和本章中所用到的大部分宏文件及说明。因此如果在源程序中包含了 udf.h 文件，那么也就包含了各种求解器读写文件。

下面列出了一些变量，这些变量需要使用预先设计的宏来进行读写。

- 溶液变量及它们的组合变量（速度、温度、湍流量等）。
- 几何变量（坐标、面积、体积等）。
- 网格和节点变量（节点速度等）。
- 材料性质变量（密度、粘度、导电性等）。
- 分散相模拟变量。

除了指定的热量数据以外，存取数据还指读写数据。而对于指定的热量数据是只能读不能修改的。下文将列出每一个宏所包含的参数、参数类型和返回值，其参数的数据类型如下所示。

- cell_t c 是单元格标识符。
- face_t 是面积标识符。
- Thread *t 是线指示器。
- Thread **pt 是象限矩阵指示器。



● Int I 是整数。

● Node *node 是节点指示器。

1．单元宏

单元宏是由求解器返回的实数变量，并且这些变量都是在一个单元中定义的。

（1）用来读写单元流体变量的宏　在 FLUENT 软件中可以用来读写流体变量的宏如表 6-2 所示。

表 6-2　在 mem.h 文件中的流体变量宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
C_T(c,t)	cell t c, Thread *t	温度
C_T_G(c,t)	cell t c, Thread *t	温度梯度矢量
C_T_G(c,t)[i]	cell t c, Thread *t, int i	温度梯度矢量的分量
C_T_RG(c,t)	cell t c, Thread *t	改造后的温度梯度矢量
C_T_RG(c,t)[i]	cell t c, Thread *t, int i	改造后的温度梯度矢量的分量
C_T_M1(c,t)	cell t c, Thread *t	温度的前一次步长
C_T_M2(c,t)	cell t c, Thread *t	温度的前两次步长
C_P(c,t)	cell t c, Thread *t	压力
C_DP(c,t)	cell t c, Thread *t	压力梯度矢量
C_DP(c,t)[i]	cell t c, Thread *t, int I	压力梯度矢量的分量
C_U(c,t)	cell t c, Thread *t	u 方向的速度
C_V(c,t)	cell t c, Thread *t	*v* 方向的速度
C_W(c,t)	cell t c, Thread *t	w 方向的速度
C_H(c,t)	cell t c, Thread *t	焓
C_YI(c,t,i)	cell t c, Thread *t, int i	物质质量分数
C_K(c,t)	cell t c, Thread *t	湍流运动能
C_D(c,t)	cell t c, Thread *t	湍流运动能的分散
C_O(c,t)	cell t c, Thread *t	确定的分散速率

表 6-2 中_G、_RG、_M1 和_M2 这些下标的单元温度的宏可以应用于除了单元压力（C-P）外表中所有求解器的变量中。这些下标分别表示的是矢量梯度、改造的矢量梯度、前一次的步长和前两次的步长。而对于单元压力，它的矢量梯度和相应的分量是使用 C_DP 得到的，而不是 C_P_G。下面介绍每一个下标的描述和用法。

1）读写梯度矢量和其分量。在宏中加入下标_G 可以得到梯度矢量和它的分量，如 C_T_G(c,t)返回单元的温度梯度矢量。注意，只有当已经求解出包含这个变量的方程时才能得到梯度变量。例如，定义了一个关于能量的源程序，那么 UDF 可以读写单元的温度梯度（使用 C_ T _G），却不能读写 X 方向的速度分量（使用 C_ U _G）。

在调用梯度矢量时把某一分量作为参数，这样就可以得到梯度分量了（参数 0 代表 X 方向的分量，1 代表 Y 方向的分量，2 代表 Z 方向的分量），如 C_T_G(c,t)[0] 返回温度梯度 X 方向的分量。注意，在表 6-2 中虽然只列出了温度梯度和其分量求解的宏，但是却可以扩展到除了压力以外的所有变量中，对于压力只能按照表 6-2 的方法使用 C_DP 来得到压力



梯度和其分量。

2）读写改造过的梯度矢量和其分量。通过加 RG 的下标可以在宏中得到梯度向量和其分量。通过使用恰当的整数作为参数来获得所需矢量分量。当完成插补计划时，可以使用改造过的梯度。改造过的温度梯度和其分量在表 6–2 中列出了，而且可以推广到所有的变量。注意，改造过的梯度矢量和梯度矢量一样都只有在梯度方程被求解出来时才可以得到。

3）读写前一步长下的时间变量。在表里的宏中加入下标_M1 就可以得到前一次步长时间（t–Δt）下的变量的值。得到的这些数据可以在不稳定的模拟中使用，如 C_T_M1(c,t)返回前一步时间下的单元温度的值。

4）读写前两次步长下的时间变量。在表 6–2 里宏的后面加上下标_M2 就可以得到前两次步长下的时间（t–2Δt）。

（2）读写导数的宏　用于读写有速度导数的宏，如表 6–3 所示。

表 6–3　用于读写有速度导数的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
C DUDX(c,t)	cell t c, Thread *t	U 速度对 x 方向的导数
C DUDY(c,t)	cell t c, Thread *t	U 速度对 y 方向的导数
C DUDZ(c,t)	cell t c, Thread *t	U 速度对 z 方向的导数
C DVDX(c,t)	cell t c, Thread *t	V 速度对 x 方向的导数
C DVDY(c,t)	cell t c, Thread *t	V 速度对 y 方向的导数
C DVDZ(c,t)	cell t c, Thread *t	V 速度对 z 方向的导数
C DWDX(c,t)	cell t c, Thread *t	W 速度对 x 方向的导数
C DWDY(c,t)	cell t c, Thread *t	W 速度对 y 方向的导数
C DWDZ(c,t)	cell t c, Thread *t	W 速度对 z 方向的导数

（3）存取材料性质的宏　用于存取材料性质宏，如表 6–4 所示。

表 6–4　在 mem.h 中存取材料性质的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
C_FMEAN(c,t)	cell t c, Thread *t	第一次混合分数的平均值
C_FMEAN2(c,t)	cell t c, Thread *t	第二次混合分数的平均值
C_FVAR(c,t)	cell t c, Thread *t	第一次混合分数变量
C_FVAR2(c,t)	cell t c, Thread *t	第二次混合分数变量
C_PREMIXC(c,t)	cell t c, Thread *t	反应过程变量
C_LAM FLAME SPEED(c,t)	cell t c, Thread *t	层流焰速度
C_CRITICAL STRAIN	cell t c, Thread *t	临界应变速度
C_ POLLUT(c,t,i)	cell t c, Thread *t, int i	第 i 个污染物质的质量分数



（续）

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
C_R(c,t)	cell t c, Thread *t	密度
C_MU L(c,t)	cell t c, Thread *t	层流速度
C_MU T(c,t)	cell t c, Thread *t	湍流速度
C_MU EFF(c,t)	cell t c, Thread *t	有效粘度
C_K_L(c,t)	cell t c, Thread *t	热传导系数
C_K_T(c,t)	cell t c, Thread *t	湍流热传导系数
C_K_ EFF(c,t)	cell t c, Thread *t	有效热传导系数
C_CP(c,t)	cell t c, Thread *t	确定的热量
C_RGAS(c,t)	cell t c, Thread *t	气体常数
C_DIFF L(c,t,i,j)	cell t c, Thread *t, int i,int j	层流物质的扩散率
C_DIFF EFF(c,t,i)	cell t c, Thread *t, int i	物质的有效扩散率
C_ABS COEFF(c,t)	cell t c, Thread *t	吸附系数
C_SCAT COEFF(c,t)	cell t c, Thread *t	扩散系数
C_NUT(c,t)	cell t c, Thread *t	Spalart-Allmaras 模型的湍流速度

（4）读写用户定义的标量和存储器的宏 表 6-5 列出的宏可以为单元读写用户定义的标量和存储器。

表 6-5 在 mem.h 文件中的可以为单元读写用户定义的标量和存储器的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返 回 值
C _UDSI(c,t,i)	cell t c, Thread *t, int i	用户定义的标量（单元）
C_UDSI M(c,t,i)	cell t c, Thread *t, int i	前一次步长下用户定义的标量（单元）
C_UDSI_DIFF(c,t,i)	cell t c, Thread *t, int i	用户定义的标量的分散率（单元）
C_UDMI(c,t,i)	cell t c, Thread *t, int i	用户定义的存储器（单元）

（5）读写雷诺力模型的宏 表 6-6 列出的宏可以为雷诺压力模型读写变量。

表 6-6 在 metric.h 中的 RSM 宏

名字（参数）	参 数 类 型	返 回 值
C RUU(c,t)	cell t c, Thread *t	*uu* 雷诺压力
C RVV(c,t)	cell t c, Thread *t	*vv* 雷诺压力
C RWW(c,t)	cell t c, Thread *t	*ww* 雷诺压力
C RUV(c,t)	cell t c, Thread *t	*uv* 雷诺压力
C RVW(c,t)	cell t c, Thread *t	*vw* 雷诺压力
C RUW(c,t)	cell t c, Thread *t	*uw* 雷诺压力

2．面宏

面宏是在单元的边界面上定义的并且从求解器中返回一个真值，仅可在偏析求解器中使

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
第 6 章 UDF 使用简介
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

用。这些表面宏的定义可以在相关的.h 文件中找到（如 mem.h 等）。

（1）读写流体变量的宏　表 6-7 列出的宏可以在边界面读写流体变量。注意，如果表面在边界上，那么流体的方向是由 F_FLUX 决定的点指向外围空间的。

表 6-7　在 mem.h 中的流体变量读写的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
F_R(f,t)	face t f, Thread *t,	密度
F_P(f,t)	face t f, Thread *t,	压力
F_U(f,t)	face t f, Thread *t,	*u* 方向的速度
F_V(f,t)	face t f, Thread *t,	*v* 方向的速度
F_W(f,t)	face t f, Thread *t,	*w* 方向的速度
F_T(f,t)	face t f, Thread *t,	温度
F_H(f,t)	face t f, Thread *t,	焓
F_K(f t)	face t f, Thread *t,	湍流运动能
F_D(f,t)	face t f, Thread *t,	湍流运动能的分散速率
F_YI(f,t,i)	face t f, Thread *t, int i	物质的质量分数
F_FLUX(f,t)	face t f, Thread *t	通过边界表面的质量流速

（2）用于给表面读写用户定义的标量和存储器的宏如表 6-8 所示。

表 6-8　用于给表面读写用户定义的标量和存储器的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
F_UDSI(f,t,i)	face t f, Thread *t, int i	用户确定的表面标量
F_UDMI(f,t,i)	face t f, Thread *t, int i	用户定义的表面存储器

（3）读写混合面变量的宏如表 6-9 所示。

表 6-9　读写混合面变量的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
F_C0(f,t)	face t f, Thread *t	访问表面\0 边上的单元变量
F_C0_THREAD(f,t)	face t f, Thread *t	访问表面\0 边上的单元线索
F_C1(f,t)	face t f, Thread *t	访问表面\1 边上的单元变量
F_C1_ THREAD(f,t)	face t f, Thread *t	访问表面\1 边上的单元线索

3．几何宏

几何宏是在 FLUENT 软件中重新得到的几何变量，包括节点和表面的数量、重心、表面积和体积等。

（1）节点和表面的数量　表 6-10 给出了返回节点与表面个数的宏。



表 6-10　在 mem.h 中的节点和表面的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
C_NNODES(c,t)	cell t c, Thread *t	一个单元中的节点数
C_NFACES(c,t)	cell t c, Thread *t	一个单元中的表面数
F_NNODES(f,t)	face t f, Thread *t	一个表面中的节点数

（2）单元格和表面的重心　表 6-11 给出了获得一个单元或表面真实重心的宏。

表 6-11　在 metric.h 中的变量重心的宏

名字（参数）	参 数 类 型	返　回　值
C_CENTROID(x,c,t)	real x[ND ND], cell t c, Thread * t	x (单元重心)
F_CENTROID(x,f,t)	real x[ND ND], face t f, Thread *t	x (表面中心)

（3）表面积　获得表面积向量的宏如表 6-12 所示。

表 6-12　在 metric.h 中的表面积的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
F_AREA(A,f,t)	A[ND ND], face t f, Thread *t	A (表面积向量)

（4）单元格体积　获得二维、三维和轴对称的模型的单元真实体积的宏如表6-13所示。

表 6-13　在 mem.h 中的单元格体积的宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
C VOLUME(c,t)	cell t c, Thread *t	二维或三维的单元体积 单元体积/2π是轴对称模型的体积

4．节点宏

节点宏可返回单元节点的实数直角坐标（在单元的拐角）和相应的节点速度的分量。例如，在移动的网格模拟中节点速度是相对应的。每个变量的节点×节点的参数定义了一个节点。这些宏的定义可以在相关的扩展名为（.h）的文件中找到（如 mem.h）。

（1）节点坐标宏如表 6-14 所示。

表 6-14　在 metric.h 中变量的节点坐标宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
NODE X(node)	Node *node	节点的 X 坐标
NODE Y(node)	Node *node	节点的 Y 坐标
NODE Z(node)	Node *node	节点的 Z 坐标

（2）节点速度变量宏如表 6-15 所示。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
第 6 章 UDF 使用简介
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

表 6-15　在 metric.h 中的节点速度变量宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
NODE GX(node)	Node *node	节点速度的 X 分量
NODE GY(node)	Node *node	节点速度的 Y 分量
NODE GZ(node)	Node *node	节点速度的 Z 分量

5．多相宏

多相宏主要是返回一个与整体多相节点相连的实数变量。这些变量的定义在 sg_mphase.h 文件中可以找到，sg_mphase.h 文件包含在 udf.h 文件中，如表 6-16 所示。

表 6-16　在 sg_mphase.h 中的变量宏

名称（参数）	参 数 类 型	返　回　值
C VOF(c,pt[0])	cell t c, Thread **pt	主要相的体积分数
C VOF(c,pt[n])	cell t c, Thread **pt	第 *n* 个辅助相的体积分数

6.2.2　UDF 实用工具宏

FLUENT 公司提供了针对 FLUENT 软件中的变量操作的一系列工具。这些工具中大部分可以作为宏直接执行。

1．一般目的的循环宏

一般目的的循环宏主要完成基本的查询，可以用于 FLUENT 软件中单相和多相模型的 UDF 中。

（1）查询控制区的单元线　可以用 thread_loop_c 查询给定控制区的单元线。它包含单独的说明，后面是对控制区的单元线所做操作，包含在{ }中。

```
Domain *domain;
Thread *c_thread;
thread_loop_c(c_thread, domain) /*loops over all cell threads in domain*/
{
}
```



注意　thread_loop_c 在执行上和 thread_loop_f 相似。

（2）查询控制区的面　可以用 thread_loop_f 查询给定控制区的面。它包含单独的说明，后面是对控制区的面单元所做操作，包含在{ }中。注意，thread_loop_f 在执行上和 thread_loop_c 相似。

```
Thread *f_thread;
Domain *domain;
thread_loop_f(f_thread, domain)/* loops over all face threads in a domain*/
{
```



```
}
```

（3）查询单元线中的单元　可以用 begin_c_loop 和 end_c_loop 查询给定单元线 c_thread 上所有的单元。它包含 begin 和 end loop 的说明，其定义包含在{ }中，可对单元线中的单元进行操作。当需要查找控制区单元线的单元时，应用的 loop 全部嵌套在 thread_loop_c 中。

```
cell_t c;
Thread *c_thread;
begin_c_loop(c, c_thread) /* loops over cells in a cell thread */
{
}
end_c_loop(c, c_thread)
```

（4）查询面线中的面　可以用 begin_f_loop 和 end_f_loop 查找给定面线 f_thread 的所有的面。它包含 begin 和 end loop 的说明，其定义包含在{ }中，可对面线中的面单元进行操作。当查找控制区面线的所有面时，应用的 loop 嵌套在 thread_loop_f 中。

```
face_t f;
Thread *f_thread;
begin_f_loop(f, f_thread) /* loops over faces in a face thread */
{
}
end_f_loop(f, f_thread)
```

（5）查询单元中的面　下面函数用于查询给定单元中所有面。它包含单独的查询说明，后面是所做的操作，包含在{}中。

```
face_t f;
Thread *tf;
int n;
c_face_loop(c, t, n) /* loops over all faces on a cell */
{
. . .
f = C_FACE(c,t,n);
tf = C_FACE_THREAD(c,t,n);
. . .
}
```

这里，n 是本地-面的索引号。本地-面的索引号用在 C_FACE 宏中以获得所有面的数量。

另一个在 c_face_loop 中有用的宏是 C_FACE_THREAD。这个宏用于合并两个面线。

（6）查询单元节点　可以用 c_node_loop 查询单元节点。下面函数用于查询给定单元中所有节点，包含单独的查询说明，后面是所做的操作，包含在{}中。

```
cell_t c;
Thread *t;
int n;
c_node_loop(c, t, n)
```


1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
第 6 章 UDF 使用简介
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

```
{
. . .
node = C_NODE(c,t,n);
. . .
}
```

这里，n 是本地节点的索引号。本地-面的索引号用在 C_NODE 宏中以获得所有面的数量。

2．多相组分查询宏

多相组分查询宏用于多相模型的 UDF 中。

（1）查询混合物中相的控制区　sub_domain_loop 宏用于查询混合物控制区的所有相的子区。这个宏查询并在混合物控制区给每个相区定义指针以及相关的 phase_domain_index。注意，sub_domain_loop 宏在执行中和 sub_thread_loop 宏相似。

```
int phase_domain_index; */ index of subdomain pointers */
Domain *mixture_domain;
Domain *subdomain;
sub_domain_loop(subdomain, mixture_domain, phase_domain_index)
```

sub_domain_loop 宏的变量是 subdomain、mixture_domain 和 phase_domain_index。

subdomain 是 phase-level domain 的指针，mixture_domain 是 mixture-level domain 的指针。当使用 DEFINE 宏时，mixture_domain（包含控制区变量 e.g., DEFINE_ADJUST）通过 FLUENT 软件中的求解器自动传递 UDF，混合物就和 UDF 相关了。如果 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，则使用另外一个宏来恢复它。phase_domain_index 是子区指针索引号，phase_domain_index 是初始相的索引号，用 0 表示，混合物中其他的相依次加 1。


注意

subdomain 和 phase_domain_index 是在 sub_domain_loop 宏定义中初始化的。

（2）查询混合物的相线　sub_thread_loop 宏在所有与混合线程相关的子线程上循环。这个宏运行并将指针返回每个子线程及相关的 phase_domain_index。如果 subthread 指针与入口区域相关，那么这个宏将提供给入口区域每个相面线指针。

```
int phase_domain_index;
Thread *subthread;
Thread *mixture_thread;
sub_thread_loop(subthread, mixture_thread, phase_domain_index)
```

sub_thread_loop 宏的自变量是 subthread、mixture_thread 和 phase_domain_index。

subthread 是相线的指针, mixture_thread 是 mixture-level thread 的指针。当使用 DEFINE 宏（包含一个线自变量）时，通过 FLUENT 软件中的求解器 mixture_thread 自动传递给 UDF，UDF 就和混合物相关了。如果 mixture_thread 没有显式地传递给 UDF，则需要在调



用 sub_thread_loop 之前，调用工具宏恢复它。phase_domain_index 是子区指针索引号，可以用 phase_domain_index 宏恢复。初始相的索引号为 0，混合物中其他相依次加 1。



注意　subthread 和 phase_domain_index 在 sub_thread_loop 宏定义中被初始化。

（3）查询混合物中所有单元的线　mp_thread_loop_c 宏在混合域内所有的单元线程中循环，并提供了与每个混合线程相关的子线程的指针。当在混合域使用时，该宏几乎和 thread_loop_c 宏是等价的。不同在于，除了运行每个单元线程外，该宏也会返回一个与相关子线程等价的指针数组（pt）。单元线第 i 相的指针是 pt[i]，这里 i 是相控制区索引号 phase_domain_index。pt[i]可以用做宏的自变量，需要相等值线的指针。相控制区索引号 phase_domain_index 可以用 phase_domain_index 宏恢复。

```
Thread **pt;
Thread *cell_threads;
Domain *mixture_domain;
mp_thread_loop_c(cell_threads, mixture_domain, pt)
```

mp_thread_loop_c 宏的自变量是 cell_threads、mixture_domain 和 pt。cell_threads 是网格线的指针， mixture_domain 是 mixture-level domain 的指针， pt 是含有 phase-level 的指针数组。

当用包含控制区变量（e.g., DEFINE_ADJUST）的宏 DEFINE 时，mixture_domain 通过 FLUENT 软件中的求解器自动传递给 UDF 文件， UDF 就和混合物相关了。如果 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF 文件，则应用另外一个工具 e.g., Get_Domain（1）来恢复。注意，pt 和 cell_threads 的值是由查询函数派生出来的。mp_thread_loop_c 是典型的用于 begin_c_loop 中，begin_c_loop 查询网格线内的所有网格。当 begin_c_loop 嵌套在 mp_thread_loop_c 中,就可以查询混合物中相单元线的所有网格了。

（4）查询混合物中所有的相面线　mp_thread_loop_f 宏查询混合物控制区内所有混合物等值线的面线并且给每个与混合物等值线有关的相等值线指针。在混合物控制区内 mp_thread_loop_f 宏和 thread_loop_f 宏几乎是等价的。区别是：除了查找每一个面线，这个宏还返回一个指针数组 pt，它与相等值线相互关联。指向第 i 相的面线指针是 pt[i]，这里 i 是相控制区索引号 phase_domain_index。当需要相等值线指针时，pt[i] 可以作为宏的自变量。phase_domain_index 可以用 phase_domain_index 宏恢复。

```
Thread **pt;
Thread *face_threads;
Domain *mixture_domain;
mp_thread_loop_f(face_threads, mixture_domain, pt)
```

mp_thread_loop_f 宏的自变量是 face_threads、mixture_domain 和 pt。face_threads 是面线的指针，mixture_domain 是 mixture_level domain 的指针，pt 是含有 phase-level 的指针数组。

当用包含控制区变量（e.g., DEFINE_ADJUST）的宏 DEFINE 时，mixture_domain 通过 FLUENT 软件中的求解器自动传递给 UDF 文件，UDF 就和混合物相关了。如果 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF 文件，则应用另外一个工具 e.g., Get_Domain（1）来恢复。


注意

pt 和 cell_threads 的值是由查询函数派生出来的。mp_thread_loop_f 宏是典型的用于 begin_f_loop 宏中。begin_f_loop 宏查询网格线内的所有网格。当 begin_f_loop 宏嵌套在 mp_thread_loop_f 宏中，就可以查询混合物中相单元线的所有网格。

3．设置面变量的宏

当设置面变量的值时，可应用 F_PROFILE 宏。当生成边界条件的外形或存储新的变量值时，自动调用这一函数。

```
F_PROFILE( f, t, n)
```

F_PROFILE 宏的自变量是 f，面的索引号是 face_t，t 面上线的指针还有一个整数 n。这些变量通过 FLUENT 软件中的求解器自动传递给 UDF，不需要赋值。整数 n 是在边界上设定的变量标志符。例如，进口边界包含总压和总温，二者都在用户定义函数中定义。进口边界的变量在 FLUENT 软件中赋予整数 0，其他赋予 1。当在 FLUENT 软件中的进口边界面板中定义边界条件时，这些整数值由求解器设定。

4．访问没有赋值的自变量的宏

针对单相和多相的模型（如定义源项、性质和外形），大多数标准的 UDF 在求解过程中通过求解器自动作为自变量直接传递给 UDF。然而，并非所有的 UDF 都直接把函数所需要的自变量传递给求解器。例如，DEFINE_ADJUST 宏和 DEFINE_INIT UDFs 宏传递给混合物控制区变量，这里 DEFINE_ON_DEMAND UDFs 是没有被传递的自变量。下面提供了通过 DEFINE 函数访问没有被直接传递给 UDF 文件的工具。

（1）Get_Domain　若控制区指针没有显式地作为自变量传递给 UDF，则可以用 Get_Domain 宏恢复控制区指针。

```
Get_Domain(domain_id);
```

domain_id 是一个整数，混合物控制区其值为 1，在多相混合物模型中其值依次加 1。

在单相流中，domain_id 为 1，Get_Domain（1）将放回流体控制区指针。

```
DEFINE_ON_DEMAND(my_udf)
{
Domain *domain; /* domain is declared as a variable */
domain = Get_Domain(1); /* returns fluid domain pointer */
...
}
```

在多相流中，Get_Domain 的返回值或者是混合物等值线，或单相等值线，或相等值线或相等值线控制区指针。domain_id 的值在混合物控制区始终是 1，可以用 FLUENT 软件中的图形用户界面获得 domain_id。



```
DEFINE_ON_DEMAND(my_udf)
{
Domain *mixture_domain;
mixture_domain = Get_Domain(1); /* returns mixture domain pointer */
/* and assigns to variable */
Domain *subdomain;
subdomain = Get_Domain(2); /* returns phase with ID=2 domain pointer*/
/* and assigns to variable */
...
}
```

（2）通过相控制区索引号使用相控制区指针　有两个方法可以获得混合物控制区具体相（或子区）的指针。

1）用 DOMAIN_SUB_DOMAIN 宏。

2）Get_Domain。

DOMAIN_SUB_DOMAIN 宏有两个自变量： mixture_domain 和 phase_domain_index。这个函数返回给定 phase_domain_index 的相指针。



注意　DOMAIN_SUB_DOMAIN 宏在执行上和 THREAD_SUB_THREAD 宏相似。

```
int phase_domain_index = 0; /* primary phase index is 0 */
Domain *mixture_domain;
Domain *subdomain = DOMAIN_SUB_DOMAIN(mixture_domain,phase_domain_index);
```

mixture_domain 是 mixture-level domain 的指针。

当用包含控制区自变量（如 DEFINE_ADJUST）and 的 DEFINE 宏时，自动通过 FLUENT 软件中的求解器传递给 UDF 文件， UDF 文件就和混合物相关联了。否则，如果 mixture_domain 没有显式地传递给 UDF，就需要在调用 sub_domain_loop 宏之前，用其他宏工具来恢复（如 Get_Domain（1））。

phase_domain_index 是子区指针的索引号。它是一个整数，初始相值为 0，以后每相依次加 1。当用包含相控制区变量（DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY, DEFINE_VECTOR_EXCHANGE_PROPERTY）的 DEFINE 宏时，phase_domain_index 自动通过 FLUENT 软件中的求解器传递给 UDF，UDF 就和互相作用的相关联了。否则，需要用硬代码调用 DOMAIN_SUB_DOMAIN 宏给 phase_domain_index 指针赋值。如果多相流模型有两相，则 phase_domain_index 初始相的值是 0，第二相的值为 1。然而，如果多相流模型中有更多的相，就需要用 PHASE_DOMAIN_INDEX 宏来恢复与给定控制区的 phase_domain_index。

（3）通过相控制区索引号使用相等值线指针　THREAD_SUB_THREAD 宏可以用来恢复给定相控制区索引号的 phase-level thread（subthread）指针。THREAD_SUB_THREAD 宏有两个自变量：mixture_thread 和 phase_domain_index。这一函数返回给定 phase_domain_index 的 phase-level 线指针。


注意　THREAD_SUB_THREAD 宏在执行上与 DOMAIN_SUB_DOMAIN 宏相似。

```
int phase_domain_index = 0; /* primary phase index is 0 */
Thread *mixture_thread; /* mixture-level thread pointer */
Thread *subthread = THREAD_SUB_THREAD(mixture_thread,phase_domain_index);
```

mixture_thread 是 mixture-level 线的指针。当使用包含控制区自变量（如 DEFINE_PROFILE）和 DEFINE 宏时，就会自动通过 FLUENT 软件中的求解器传递给 UDF 文件，UDF 文件就和混合物相关联了。否则，如果混合物控制线指针没有显式地传递给 UDF，就需要在调用 Lookup_Thread 宏之前，用另外一个宏工具来恢复（如 Get_Domain（1））。

phase_domain_index 是子区指针的索引号。它是一个整数，初始相值为 0，以后每相依次加 1。当使用包含相控制区索引号变量（DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY, DEFINE_VECTOR_EXCHANGE_PROPERTY）的 DEFINE 宏时，phase_domain_index 通过 FLUENT 软件中的求解器自动传递给 UDF，UDF 就和具体的相互作用相互关联了。否则，就需要用硬代码改变宏 THREAD_SUB_THREAD 的 phase_domain_index 值。如果多相流模型中只有两相，那么 phase_domain_index 对初始相是 0，第二个相为 1。然而，如果有更多的相，就需要用 PHASE_DOMAIN_INDEX 宏来恢复与给定区域相关的 phase_domain_index 。

（4）通过混合物等值线使用相线指针数组　THREAD_SUB_THREADS 宏可以用于恢复指针数组 pt，它的元素包含相等值线（子线）的指针。THREADS_SUB_THREADS 宏有一个变量 mixture_thread。

```
Thread *mixture_thread;
Thread **pt; /* initialize pt */
pt = THREAD_SUB_THREADS(mixture_thread);
```

mixture_thread 是 mixture-level thread 代表网格线或面线的指针。当用包含线变量 DEFINE 宏时，就会通过 FLUENT 软件中的求解器自动传递给 UDF，这个函数就和混合物相关联了。否则，如果混合物线的指针没有显式地传递给 UDF，就需要用令一个方法来恢复。

pt[i] 数组的元素是与第 I 相的相等值线有关的值，这里 i 是 phase_domain_index。当要恢复网格具体相的信息时，可以用 pt[i] 作为一些网格变量宏的自变量。指针 pt[i] 可以用 THREAD_SUB_THREAD 宏来恢复，用 I 作为自变量。phase_domain_index 可以用 PHASE_DOMAIN_INDEX 宏来恢复。

（5）通过相控制区指针调用混合物控制区指针　当 UDF 有权访问特殊的相等值线（子区）指针时，可以用 DOMAIN_SUPER_DOMAIN 宏恢复混合物等值线控制区指针。DOMAIN_SUPER_DOMAIN 宏含有一个变量 subdomain。


注意　DOMAIN_SUPER_DOMAIN 宏在执行上和 THREAD_SUPER_THREAD 宏非常相似。

```
Domain *subdomain;
```



```
Domain *mixture_domain = DOMAIN_SUPER_DOMAIN(subdomain);
```

subdomain 是多相流混合物控制区相等值线的指针。当用包含控制区变量 DEFINE 宏时，通过 FLUENT 软件中的求解器，它可以自动传递给 UDF 文件，这个函数就会和混合物中的第一相和第二相相关联了。



注意　在 FLUENT6.3 版本中，DOMAIN_SUPER_DOMAIN 宏将返回与 Get_Domain(1)相同的指针。这样，如果 UDF 可以使用子区的指针，建议使用 DOMAIN_SUPER_DOMAIN 宏来代替 Get_Domain 宏以避免将来的 FLUENT 版本造成不兼容问题。

（6）通过相线指针使用混合物线指针　当 UDF 有权访问某一条相线子线指针，而想恢复混合物的等值线指针时，可以使用 THREAD_SUPER_THREAD 宏。THREAD_SUPER_THREAD 宏有一个自变量 subthread。

```
Thread *subthread;
Thread *mixture_thread = THREAD_SUPER_THREAD(subthread);
```

subthread 在多相流混合物中是一个特殊的相等值线指针。当用包含线变量 DEFINE 宏时，通过 FLUENT 软件中的求解器，它自动传递给 UDF 文件，这个函数就和混合物中的两相相互关联了。

（7）通过区的 ID 使用线指针　当要在 FLUENT 软件的边界条件面板中恢复与给定区域 ID 的线指针时，可以使用 Lookup_Thread 宏。UDF 还可以使用 Lookup_Thread 宏来获得指针。这一过程分两步：首先，从 FLUENT 软件的边界条件面板中导入区域的 ID；然后，使用硬代码作为自变量调用 Lookup_Thread 宏。Lookup_Thread 宏返回与给定区域 ID 相关的线的指针。可以将线指针赋给 thread_name，在 UDF 中使用。

```
int zone_ID;
Thread *thread_name = Lookup_Thread(domain,zone_ID);
```

在多相流的上下文中，通过 Lookup_Thread 宏返回的线是与控制区自变量相关的相的等值线。

（8）使用相的控制区指针　当有权访问与给定相等值线控制区指针的 domain_id 时，可以使用 DOMAIN_ID 宏。DOMAIN_ID 宏有一个自变量 subdomain，它是相等值线控制区的指针。控制区（混合物）的最大的等值线的 domain_id 的默认值是 1，即如果被传递给 DOMAIN_ID 宏的控制区指针是混合物控制区的等值线指针，那么函数的返回值为 1。



注意　当在 FLUENT 软件的相面板中选择需要的相时，宏所返回的 domain_id 是和显示在图形用户界面中的整数值 ID 是相同的。

```
Domain *subdomain;
int domain_id = DOMAIN_ID(subdomain);
```

（9）通过相控制区使用相控制区索引号 PHASE_DOMAIN_INDEX 宏返回给定相等值线控制区（子区）指针的 phase_domain_index。PHASE_DOMAIN_INDEX 宏有一个自变量 subdomain，它是 phase-level domain 的指针。phase_domain_index 是子区指针的索引号。初始相的值为整数 0，以后每相依次加 1。

```
Domain *subdomain;
int phase_domain_index = PHASE_DOMAIN_INDEX(subdomain);
```

5．访问邻近网格和线的变量

可以用 Fluent Inc. 提供的宏来确定邻近网格面。在复杂的 UDF 文件中，当查询特定网格或线的面时，可能会用到这个信息。对给定的面 f 和它的线 tf，两个相邻的网格点为 c0 和 c1。如果是控制区附面层上的面，则只有 c0、c1 的值为 NULL。一般的，当把网格导入到 FLUENT 软件中时，按照右手定则定义面上节点的顺序，面 f 上的网格点 c0、c1 都存在。下面是宏返回网格点 c0 和 c1 的 ID 和所在的线。

```
cell_t c0 = F_C0(f,tf); /* returns ID for c0*/
tc0 = THREAD_T0(tf); /* returns the cell thread for c0 */
cell_t c1 = F_C1(f,tf); /*returns ID for c1 */
tc1 = THREAD_T1(tf); /* returns the cell thread for c1 */
```

宏与 F_AREA 和 F_FLUX 返回的信息是直接相关的，这些值从网格 c0 到 c1 返回正值。

6．为网格定义内存

为了存储、恢复由 UDF 网格区域变量的值，可以用 C_UDMI 函数分配 500 个单元。这些值可以用做后处理。例如，通过其他的 UDFs。这个在用户定义内存中存储变量的方法比用户定义标量(C_UDSI)更有效。

```
C_UDMI( c, thread, index)
```

C_UDMI 有 3 个自变量：c、thread 和 index。c 是网格标志符号，thread 是网格线指针，index 是识别数据内存分配的。与索引号 0 相关的用户定义的内存区域为 0（或 udm-0）。在在内存中存放变量之前，首先需要在 FLUENT 软件的 User-Defined Memory 面板中分配内存。

7．矢量工具

FLUENT 软件提供了一些工具，可以用来在 UDF 中计算有关矢量的量。这些工具在源程序中以宏的形式运行。例如，可以用实函数 NV_MAG(V)计算矢量 V 的大小（模）。另外，可以用函数 NV_MAG2(V)获得矢量 V 模的平方。在矢量工具宏中有个约定俗成的惯例，V 代表矢量，S 代表标量，D 代表一系列三维的矢量，最后一项在二维计算中被忽略。

在矢量函数中约定的计算顺序，即括号、指数、乘除、加减（PEMDAS）不再适用。相反下画线符号(_)用来表示一组操作数，因此对元素的操作先于形成一个矢量。注意，这部分所有的矢量工具都用在 D 和 3D 中。因此，没有必要在 UDF 中做任何的测试。

（1）NV_MAG：计算矢量的大小，即矢量二次方和的二次方根。

```
NV_MAG(x)
2D: sqrt(x[0]*x[0] + x[1]*x[1]);
```



```
3D: sqrt(x[0]*x[0] + x[1]*x[1] + x[2]*x[2]);
```

（2）NV_MAG2：计算矢量的二次方和。

```
NV_MAG2(x)
2D: (x[0]*x[0] + x[1]*x[1]);
3D: (x[0]*x[0] + x[1]*x[1] + x[2]*x[2]);
```

（3）ND_ND：在 RP_2D（FLUENT 2D）和 RP_3D（FLUENT 3D）中，常数 ND_ND 定义为 2。如果要在 2D 中建立一个矩阵，或在 3D 中建立一个矩阵，则可以用到它。

```
real A[ND_ND][ND_ND]
for (i=0; i<ND_ND; ++i) for (j=0; J<ND_ND; ++j)
A[i][j] = f(i, j);
```

（4）ND_SUM：计算 ND_ND 的和。

```
ND_SUM(x, y, z)
2D: x + y;
3D: x + y + z;
```

（5）ND_SET：产生 ND_ND 任务说明。

```
ND_SET(u, v, w, C_U(c, t), C_V(c, t), C_W(c, t))
u = C_U(c, t);
v = C_V(c, t);
if 3D:
w = C_W(c, t);
```

（6）NV_V ：完成对两个矢量的操作。

```
NV_V(a, =, x);
a[0] = x[0]; a[1] = x[1]; etc.
```



注意　如果在上面的方程中用 += 代替=，将得到 a[0]+=x[0]；等语句。

（7）NV_VV：完成对矢量的基本操作。在下面的宏调用中，这些操作用符号（–，/，*）代替。

```
NV_VV(a, =, x, +, y)
2D: a[0] = x[0] + y[0], a[1] = x[1] + y[1];
```

（8）NV_VS_VS：用来把两个矢量相加（后一项都乘以一个常数）。

```
NV_V_VS(a, =, x, +, y, *, 0.5);
2D: a[0] = x[0] + (y[0]*0.5), a[1] = x[1] +(y[1]*0.5);
```



注意　符号+ 可以换成–, *或/, 符号 * 可以替换成 /。

（9）NV_VS_VS：用来把两个矢量相加（每一项都乘以一个常数）。

```
NV_VS_VS(a, =, x, *, 2.0, +, y, *, 0.5);
2D: a[0] = (x[0]*2.0) + (y[0]*0.5), a[1] = (x[1]*2.0) + (y[1]*0.5);
```



注意　符号+ 可以换成–, *或/, 符号 * 可以替换成 /。

（10）ND_DOT：计算两个矢量的点积。

```
ND_DOT(x, y, z, u, v, w)
2D: (x*u + y*v);
3D: (x*u + y*v + z*w);
NV_DOT(x, u)
2D: (x[0]*u[0] + x[1]*u[1]);
3D: (x[0]*u[0] + x[1]*u[1] + x[2]*u[2]);
NVD_DOT(x, u, v, w)
2D: (x[0]*u + x[1]*v);
3D: (x[0]*u + x[1]*v + x[2]*w);
```

8．与非定常数值模拟有关的宏

用 RP 变量宏有权访问 UDF 中非定常的变量。例如，UDF 可以利用 RP_Get_Real 宏获得流动时间。

```
real current_time;
current_time = RP_Get_Real("flow-time");
```

表 6-17 是在每个时间步长处理时间信息的 RP 宏列表。

表 6-17　RP 宏列表

RP 宏	返 回 信 息
RP_Get_Real("flow-time")	返回当前的计算时间 (秒)
RP_Get_Real("physical-time-step")	返回当前的计算时间 步长(秒)
RP_Get_Integer("time-step")	返回当前的计算时间 步长数(秒)

6.2.3　常用 DEFINE 宏

UDF 是用 FLUENT 软件中提供的 DEFINE 宏加以定义的。DEFINE 宏一般分为通用 DEFINE 宏、模型指定的 DEFINE 宏、多相流模型中的 DEFINE 宏、离散相模型（DPM）以及动网格模型中的 DEFINE 宏。



1．通用 DEFINE 宏

通用 DEFINE 宏执行了 FLUENT 软件中模型相关的通用求解器函数。FLUENT 软件中 DEFINE 宏及这些宏定义的功能和激活这些宏的面板的快速参考向导如表 6-18 所示。

表 6-18　通用 DEFINE 宏

功　　能	DEFINE 宏	激活该宏的面板
处理变量	DEFINE_ADJUST	User-Defined Function HoOKs
初始化变量	DEFINE_INIT	User-Defined Function HoOKs
异步执行	DEFINE_ON_DEMAND	Execute On Demand
读写变量到 case 和 data 文件	DEFINE_RW_FILE	User-Defined Function HoOKs
控制时间步长	DEFINE_DELTAT	User-Defined Function HoOKs
计算流量	DEFINE_EXECUTE_AT_END	Execute On Demand

下面对通用 DEFINE 宏的功能和使用方法进行简单介绍。

（1）DEFINE_ADJUST　DEFINE_ADJUST 宏是一个用于调节和修改 FLUENT 软件中变量的通用宏。可以用来修改流动变量（如速度、压力）并计算积分，或者对某一标量在整个流场上积分，然后在该结果的基础上调节边界条件。在每一步迭代中都可以执行用 DEFINE_ADJUST 定义的宏，并在解输运方程之前的每一步迭代中调用它。该函数包括两个哑元：symbol name 和 Domain*d。name 是所指定的 UDF 的名字；d 是 FLUENT 软件中的求解器传给 UDF 的变量。该函数不返回任何值给求解器。

（2）DEFINE_INIT　DEFINE_INIT 宏可以定义一组解的初始值。每一次初始化后，该函数都会被执行一次，并在求解器完成默认的初始化之后立即被调用，与使用 patch 一样，常用于设定流动变量的初值。该函数包括两个哑元：symbol name 和 Domain*d。name 是所指定的 UDF 的名字；d 是 FLUENT 软件中的求解器传给 UDF 的变量。该函数不返回任何值给求解器。

（3）DEFINE_ON_DEMAND　DEFINE_ON_DEMAND 宏可以定义一个按命令执行的 UDF，UDF 只有在接到用户指令被激活的时候才能被调用，并不和迭代过程联系在一起。该函数只有一个哑元：symbol name。name 是所指定的 UDF 的名字，该函数不返回任何值给求解器。

（4）DEFINE_RW_FILE　DEFINE_RW_FILE 宏被用于定义要写入 case 或 data 文件的信息，可以保持或储存任何 data 类型的自定义变量。该函数包括两个哑元：symbol name 和 FILE*fp。name 是所指定的 UDF 的名字；fp 是 FLUENT 软件中的求解器传给 UDF 的变量。该函数不返回任何值给求解器。

（5）DEFINE_DELTAT　DEFINE_DELTAT 宏用于非定常问题求解时，时间步长的控制和调整，只有在可变时间步长度选项被激活的情况下才可以调用。函数返还值就是时间步长的值。该函数包括两个哑元：symbol name 和 Domain*d。name 是所指定的 UDF 的名字；d 是 FLUENT 软件中的求解器传给 UDF 的变量。该函数的返回值是实型。

（6）DEFINE_EXECUTE_AT_END　DEFINE_EXECUTE_AT_END 宏在迭代的最后一步或者最后一个时间步完成后被执行。如果想在某个特殊的时刻计算流量，则可以调用该函数。该函数只有一个哑元：symbol name。name 是所指定的 UDF 的名字，该函数不返回任何值给求解器。

除此之外，还有在退出 FLUENT 软件中任务时执行的 DEFINE_EXECUTE_AT_EXIT 宏、在所指定的某个图标或者其他 GUI 控件被单击的时候执行的 DEFINE_EXECUTE_FROM_GUI 宏以及只能用于编译型 UDF 中，在 FLUENT 软件加载编译完 UDF 时执行的 DEFINE_EXECUTE_ON_LOADING 宏。

2．模型指定的 DEFINE 宏

模型指定的 DEFINE 宏用于设置 FLUENT 软件中特定模型的参数。表 6-19 列出了相关模型指定宏的函数名与功能。

表 6-19　相关模型指定宏的函数名与功能

DEFINE 宏函数名	功　　能
DEFI　DEFINE_PROFILE	自定义边界截面上的变量分布
DEFINE_PROPERTY	自定义材料属性
DEFINE_HEAT_FLUX	用于修正壁面的热通量
DEFINE_NET_REATION_RATE	返回所有组分的质量净摩尔反应速率
DEFINE_CHEM_STEP	在给定时间步上积分获得所有组分的均相净质量反应率，可用于 EDC 和 PDF 输运模型
DEFINE_SOURCE	定义用户源项
DEFINE_CPHI	部分预混燃烧模型中混合常数的定义
DEFINE_TURB_PREMIX_SOURCE	定义湍流燃烧率和源项
DEFINE_DIFFUSIVITY	用于定义组分输运方程或者用户自定义标量（UDS）方程中扩散率和扩散系数的确定
DEFINE_DOM_DIFFUSE_REFLECTIVITY	常用于修改界面上的扩散反射率和扩散传播率
DEFINE_DOM_SPECULAR_REFLECTIVITY	改变特殊反射半透明壁面的内表面发射率
DEFINE_DOM_SOURCE	改变关于离散坐标辐射模型中辐射输运方程中的发射项和散射项等源项
DEFINE_SCAT_PHASE_FUNC	为辐射模型定义辐射分数相函数
DEFINE_SOLAR_INTENSITY	用于太阳辐射模型中定义辐射强度参数
DEFINE_GRAY_BAND_ABS_COEFF	自定义灰带的吸收系数为温度的某个函数，用于非灰带 DO 辐射模型
DEFINE_VR_RATE	自定义容积化学反应速率表达式
DEFINE_SR_RATE	定义用户表面反应率
DEFINE_NOX_RATE	用于修改热、燃料等各种 NOX 的生成率
DEFINE_SOX_RATE	修改 SOX 的生成率
DEFINE_PR_RATE	在粒子表面反应模型中自定义一个粒子表面反应
DEFINE_PRANDTL_(D、K、O、T、T_WALL)	用于湍流计算中规定的各个湍流参数方程的普朗特数
DEFINE_TRUBULENT_VISCOSITY	自定义一种湍流粘性系数函数
DEFINE_WALL_FUNCTIONS	自定义壁面函数

3．多相流模型中的 DEFINE 宏

多相流模型中的 DEFINE 宏只应用在多相流模型中。表 6-20 简单介绍了其主函数。



表 6-20　多相流模型中的 DEFINE 宏

DEFINE 宏函数名	功　　能
DEFINE_CAVITATION_RATE	对一个多相混合模型流动建立由压力张力而产生水蒸气的模型
DEFINE_EXCHANGE_PROPERTY	规定关于多相模型中相间相互作用变量的 UDFs
DEFINE_HET_RXN_RATE	指定多相反应速率
DEFINE_MASS_TRANSFER	指定多相流问题中的质量传输速率
DEFINE_VECTOR_EXCHANGE_PROPERTY	定义相间速度滑移

4．DPM DEFINE 宏

离散相模型中的（DPM）DEFINE 宏的主函数功能如表 6-21 所示。

表 6-21　离散相模型中的 DEFINE 宏

DEFINE 宏函数名	功　　能
DEFINE_DPM_BC	自定义粒子达到边界后的状态
DEFINE_DPM_BODY_FORCE	定义除粒子重力或阻力外其他体积力
DEFINE_DPM_DRAG	自定义颗粒和流体之间的阻力系数
DEFINE_DPM_EROSION	定义颗粒撞击壁表面后的腐蚀和增长率
DEFINE_DPM_INJECTION_INIT	自定义颗粒入射到流场中的初始条件
DEFINE_DPM_LAW	自定义粒子定律
DEFINE_DPM_OUTPUT	修改写入取样输出的内容
DEFINE_DPM_PROPERTY	自定义离散粒子的材料属性
DEFINE_DPM_SCALAR_UPDATE	在每次颗粒位置更新后更新标量的值
DEFINE_DPM_SOURCE	自定义粒子运动方程中的源项
DEFINE_DPM_SWITCH	修改粒子定律之间的转换标准
DEFINE_DMP_TIMESTEP	自定义颗粒轨道模型中的时间步长
DEFINE_DMP_VP_EQUILIB	指定平衡蒸汽压力

5．动网格模型中的 DEFINE 宏

动网格模型中的 DEFINE 宏中相关函数及其功能如表 6-22 所示。

表 6-22　动网格模型中的 DEFINE 宏

DEFINE 宏函数名	功　　能
DEFINE_GC_MOTION	定义重心移动
DEFINE_GEOM	定义变形的几何区域，重新配置节点
DEFINE_GRID_MOTION	独立控制每个节点的运动
DEFINE_SDOF_PROPRTTIES	定义移动物体的六自由度运动规律



6.3 UDF 的解释和编译

如果使用文本编辑器编写 UDF，并且以扩展名 a.c 的形式把源文件保存在用户当前的工作目录中，那么就要准备对其进行通译或编译以及装载。而通译或编译完 UDF 之后，需要把它连接到 FLUENT 软件中，并且在用户的 FLUENT 软件模型中使用这个函数。

6.3.1 UDF 的解释

解释 UDF 是在运行时，直接从 C 语言源代码编译和装载通译的。其过程包括一个到 Interpreted UDF（通译的 UDF）面板的访问。在这个面板上，用户可以在一个单独步骤中，在源文件（如 udfexample.c）里通译相应的 UDF。一旦解释了一个源文件，不妨把 C 函数的名字及内容保存在 case 文件里，即写 case 文件。这样做的好处在于，无论今后何时读进这个 case 文件，所定义的函数都将被自动地解释。UDF 或者通过 InterpretedUDF 面板手动地解释，或者通过读进一个 case 文件而被自动地解释，如果被解释，所有包含在源文件里的解释的 UDFs 将在 FLUENT 软件的图形用户界面的面板中变得可视和可选。

UDF 的解释过程是，首先将编好的 UDF 文件安放在工作目录下，然后执行 FLUENT 软件中 Define→User-Defined→Function→Interpreted 命令，弹出 Interpreted UDFs 对话框，如图 6-3 所示。

在 Source File Name 文本框中输入 UDF 文件名（扩展名为“.c”），单击 Interpret 按钮，即开始了 UDF 的解释。若勾选 Display Assembly Listing 复选框，视图窗口还会有解释列表信息显示。如果程序有错误，FLUENT 软件就会提示错误的原因及发生错误的程序行数。解释成功后，UDF 就加载到了工程中，可根据需要在边界、材料属性或其他对话框中调用。

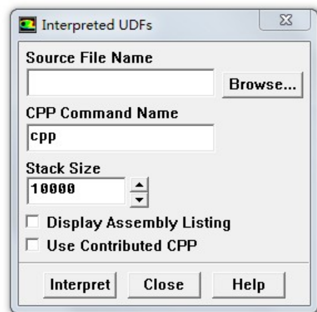


图 6-3　Interpreted UDFs 对话框

6.3.2 UDF 的编译

编译 UDF 和 FLUENT 软件的构建方式一样，主要用于对不支持解释运行的函数进行编译。脚本 Make file 被用来调用 C 编译器来构建一个当地目标代码库。其编辑过程包括两步：建立和装载。首先，访问 Compiled UDF（汇编的 UDF）面板，在这个面板上从一个或多个源文件 Build（建立）一个共享库，然后把共享库（如 libudf）Load（装载）进 FLUENT 软件中。一旦共享库被装载，可以把它写进 case 文件中，以便以后读进这个 case 文件的时候，共享库被自动地装载，从而避免了每次运行一个模拟时必须重新装载所编译的库。UDF 或者通过 Compiled UDF 面板手动地编译，或者通过读进一个 case 文件而被自动地编译，如果被编译，所有包含在共享库里编译的 UDF 将在 FLUENT 软件的图形用户界面的面板中变得可视和可选。

在 FLUENT 软件内部，必须提前安装 C/C++编译器。然后执行 FLUENT 软件中 Define→User-Defined→Function→Complied 命令，弹出 Compiled UDFs 对话框，如图 6-4 所示。

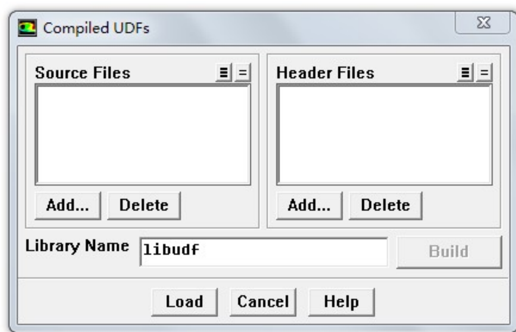


图 6-4 Compiled UDFs 对话框

在 Source Files 列表中可以增加和显示 UDF 程序。Header Files 列表中可以增加和显示需要的头文件。单击 Add 按钮，就可以加载 UDF 文件。然后再 Library Name 文本框中输入共享库的名字，并单击 Build 按钮，建立一个共享库，同时编译 UDF 文件，并把编译好的 UDF 文件放入该共享库中。若编译正确，就可单击 Load 按钮将编译好的 UDF 文件装载到当前的工程中。

6.3.3 在 FLUENT 软件中激活 UDF

1．求解初始化

如果已经编译（并连接）了 UDF，就可以在 FLUENT 软件中使用 UDF。这一 UDF 在 FLUENT 软件中将成为可见的和可选择的，执行 Define→User-Defined→Function Hooks 命令，弹出 User-Defined Function Hooks 对话框，如图 6-5 所示。单击 Adjust 文本框右边的 Edit...按钮，弹出 Adjust Functions 对话框，如图 6-6 所示。在下拉菜单中就可以进行选择。

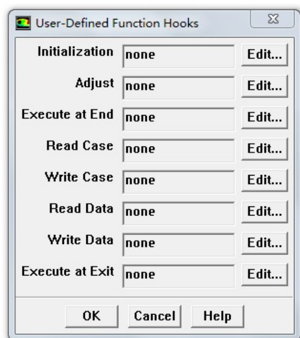


图 6-5 User-Defined Function Hooks 对话框

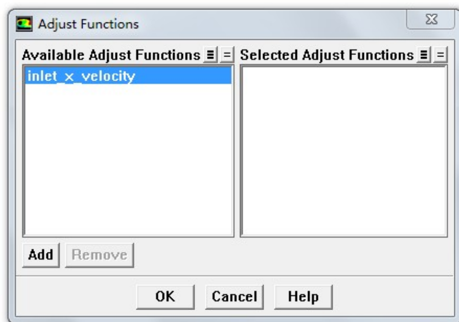


图 6-6 Adjust Functions 对话框

求解初始化 UDF 使用 DEFINE_INIT 宏定义。

2．用命令执行 UDF

执行 Define→User-Defined→Execute On Demand 命令，弹出 Execute on Demand 对话框，如图 6-7 所示。在下拉列表框中选中 UDF。

单击 Execute 按钮，以命令执行的 UDF 用 DEFINE_ON_COMMAND 宏定义。

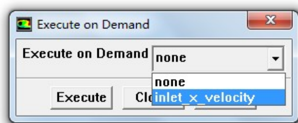


图 6-7 Execute on Demand 对话框

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
第 6 章 UDF 使用简介
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

3．从 case 和 data 文件中读出及写入

执行 Define→User-Defined→Function Hooks 命令，弹出 User-Defined Function Hooks 面板。读 Case 函数在将一个 case 文件读入 FLUENT 软件时调用，它将指定从 case 文件读出的定制片段。

写 Case 函数在从 FLUENT 软件写入一个 case 文件时调用，它将指定写入 case 文件的定制片段。

读 Data 函数在将一个 data 文件读入 FLUENT 软件时调用，它将指定从 data 文件读出的定制片段。

写 Data 函数在从 FLUENT 软件写入一个 data 文件时调用，它将指定写入 data 文件的定制片段。

上述 4 个函数用 DEFINE_RW_FUCTION 宏定义。

4．用户定义内存

可以使用 UDF 将计算出的值存入内存，以便以后能重新得到它。为了能访问这些内存，需要指定在用户定义内存（User-Defined Memory）对话框中指定用户定义内存单元数量（Number of User-Defined Memory Locations）。执行 Define→User-Defined→Memory 命令，弹出 User-Defined Memory 对话框，如图 6-8 所示。

已经存储在用户定义内存中的场值将在下次写入时存入 data 文件。这些场同样也出现在 FLUENT 软件的后处理面板的下拉列表框的 User Defined Memory...中。它们将被命名为 udm-0，udm-1 等，基于内存位置索引，内存位置的整个数量限制在 500。

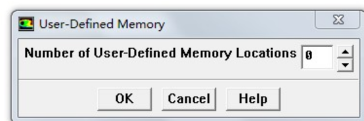


图 6-8　User-Defined Memory 对话框

5．激活 UDF

（1）边界条件　如果已经编译（并连接）了 UDF，就可以在 FLUENT 软件中使用 UDF。这一 UDF 在 FLUENT 软件中将成为可见的和可选择的，可以在适当的边界条件面板中选择它。例如，当 UDF 定义了一个速度入口边界条件，就可以在 Velocity Inlet 对话框中适当的下拉列表框中选择 UDF 名字（在 C 函数中已经定义，如 inlet_x_velocity），如图 6-9 所示。

（2）物理属性　例如，在Material面板中的Viscosity中选择User-Defined，则会弹出User-Defined Functions对话框，如图6-10所示。在其中选择合适的函数名字。如果需要编译多于一个的解释式UDF，则这些函数应在编译前连接。

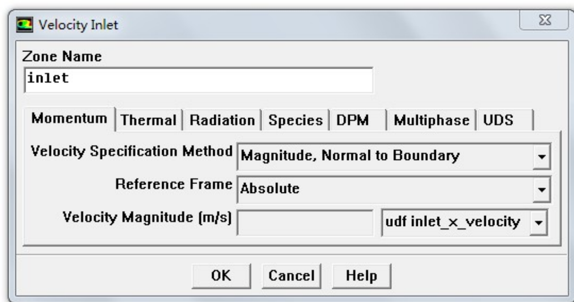


图 6-9　Velocity Inlet 对话框

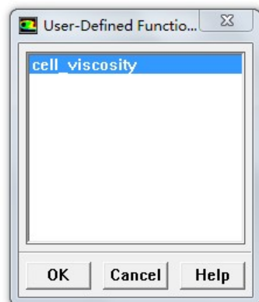


图 6-10　User-Defined Functions 对话框

此外，还可以激活多相 UDF、DPM UDF 等，在这里就不一一细说了，详尽资料请查看 UDF 使用说明。



6.4　UDF 应用实例——管道流动凝固过程

1．实例概述

如图 6-11 所示，在 2D的笛卡儿管道流动中，管道长 4m，宽 2m。液体金属（密度为 8000kg/m^3，粘度为 5.5×10^{-3}kg/m•s，比热为 680J/kg•K，热导率为 30w/m•K），在 290K的温度下从左边以 1mm/s的速度进入管道。在液体金属沿管道前进 0.5m以后，受到了冷壁面的冷却，壁面温度保持在 280K。当温度T>288K时，流体的粘度为 5.5×10^{-3}kg/m•s，而更冷区域（T<286K）的粘度有更大的值（1.0kg/m•s）。在中等温度范围内（286K≤T≤288K），粘度在上面给出的两个值之间按线性分布：μ=143.2135-0.49725T。

这个模型的基础是假设液体冷却时很快地变为高粘度，它的速度降低，所以模拟的是凝固。

2．模型的建立

启动 GAMBIT，单击 Geometry→Face→Create Real Rectangular Face，在弹出的 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 和 Height 文本框中分别输入 4 和 2，单击 Apply 按钮，得到基本图形，如图 6-12 所示。

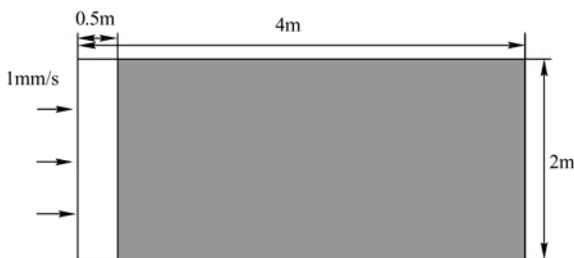


图 6-11　几何模型



图 6-12　基本图形

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，弹出 Mesh Faces 面板，选择刚创立的面，设置网格的划分方式为 Tri 和 Pave，选择 Interval Size 为 0.1，单击 Apply 按钮，得到面网格，如图 6-13 所示。

02 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中选择左侧入口边，定义为 VELOCITY_INLET 边界，名称为 in，右侧定义为 PRESSURE_OUTLET，命名为 out；选择上下两条边定义为 WALL，名称为 WALL_TOP 和 WALL_BOTTOM，如图 6-14 所示。

03 执行 File→Export→Mesh 命令，输出网格为 channel.msh。

4．编写 UDF 程序

粘度变化的 UDF 函数如下。

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity, cell, thread)
{
real mu_lam;
real temp = C_T(cell, thread);
```

```
if (temp > 288.)
mu_lam = 5.5e-3;
else if (temp > 286.)
mu_lam = 143.2135 - 0.49725 * temp;
else
mu_lam = 1.;
return mu_lam;
}
```

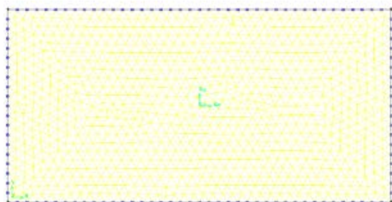


图 6-13　面网格

Name	Type
in	VELOCITY_INLI
out	PRESSURE_OU
wall_top	WALL
wall_bottom	WALL

图 6-14　Specify Boundary Types 面板

然后将程序保存为 cell_viscosity.c。

5．求解计算

01 启动 FLUENT 软件中的二维单精度计算器，执行 File→Read→Case…命令，读入网格文件 channel.msh。

02 执行 Grid→Check 命令，对网格进行检测，成功检测后执行 Grid→Scale…命令，弹出 Scale Grid 对话框。本列中绘制网格的单位是 m，不需要改变，单击 Close 按钮。

03 执行 Define→Models→Solver…命令，在弹出的 Solver 对话框中选择 Steady，其余保持默认值，单击 OK 按钮。

04 执行 Define→Models→Energy 命令，勾选 Energy 方程。

05 执行 Define→User-Defined→Functions→Interpreted…命令，加载 UDF 程序，弹出如图 6-15 所示的 Interpreted UDFs 对话框，导入 UDF 函数 cell_viscosity.c，单击 Interpret 按钮。

06 执行 Define→Materials 命令，由于该实例中的液体金属需要自己定义，所以单击 User-Defined Database 按钮，在弹出的 Open Database 对话框中填写 new liquid materials，如图 6-16 所示。然后单击 OK 按钮，弹出 User-Defined Database Materials 对话框，如图 6-17 所示。

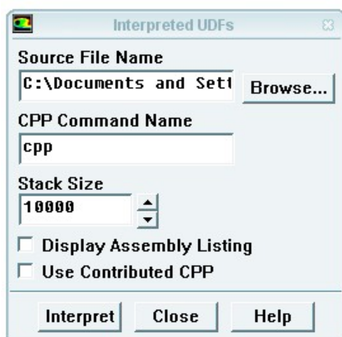


图 6-15　Interpreted UDFs 对话框



图 6-16　Open Database 对话框



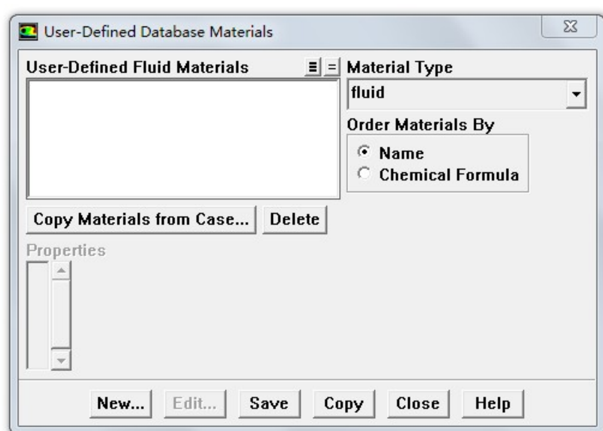


图 6-17　User-Defined Database Materials 对话框

07 在 User-Defined Database Material 对话框中单击 New 按钮，弹出 Material Properties 对话框，如图 6-18 所示。

08 选择 Types 为 fluid，Name 为 liquid_metal，在出现的 Available Properties 列表中选择 Cp、Density、Thermal Conductivity 以及 Viscosity 到 Material Properties 列表中，然后对每个选项进行定义。例如，选中 Cp，单击 Edit 按钮，弹出 Edit Property Methods 对话框，选中 constant 和 user-defined，在左下角的 Edit Properties 下拉列表框中定义 constant 为 680，如图 6-19 所示。单击 OK 按钮完成。

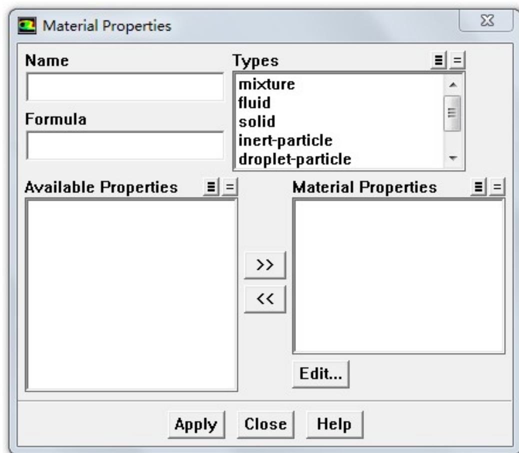


图 6-18　Material Properties 对话框

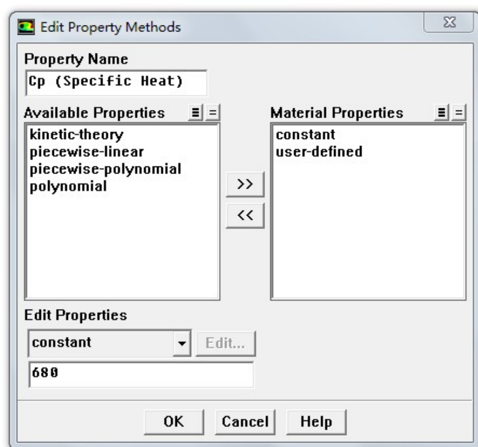


图 6-19　Edit Property Methods 对话框

09 同理，Density 为 8000；Thermal Conductivity 为 30；Viscosity 需要重新定义，故选择 user-defined，如图 6-20 所示。设定完后回到 User-Defined Database Materials 对话框，单击 Save 和 Copy 按钮，完成对参数的设定。

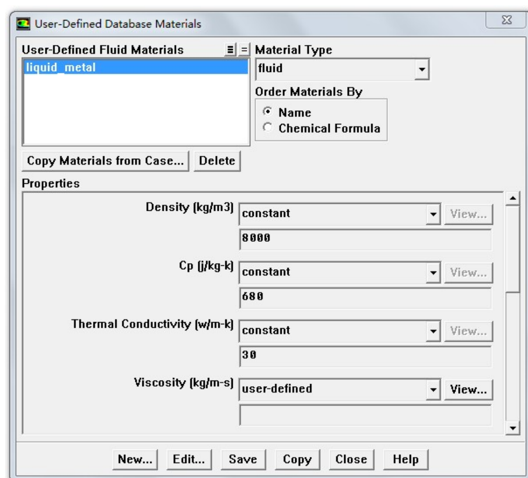


图 6-20　User-Defined Database Materials 对话框

10 回到 Materials 对话框，出现 liquid_metal，如图 6-21 所示。在 Viscosity 的下拉列表框中选择 user-defined，会弹出 User-Defined Functions 对话框，选择 cell_viscosity，单击 Create/change 按钮，即完成对材料的定义，如图 6-22 所示。

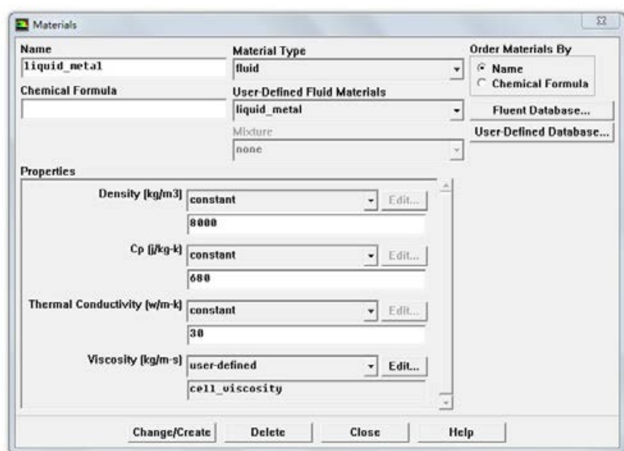


图 6-21　Materials 对话框

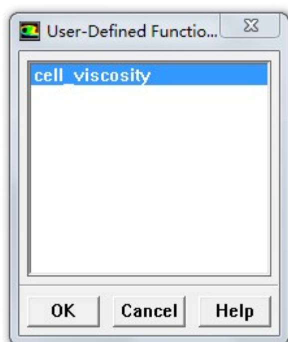


图 6-22　User-Defined Functions 对话框

11 执行 Define→Boundary Conditions 命令，在 Boundary Conditions 对话框中，选择 fluid，单击 Edit 按钮，在其对话框的 Material Name 下拉列表框中选择 liquid_metal，单击 OK 按钮。选择 in，单击 Edit 按钮，在 Velocity Inlet 对话框的 Velocity Magnitude(m/s)中输入 0.001，表示进口速度为 1mm/s，在 Thermal 下拉列表框中的 Temperature 填写 290K，单击 OK 按钮，完成速度口 in 的设定。选择 wall_top 和 wall_bottom，定义其温度为 280K。

12 执行 Solve→Initialize…命令，在 Computer Form 中选择 in，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

13 执行 Solve→Monitors→Residual 命令，选中 Plot，其余保持默认值，如图 6-23 所



示。单击 OK 按钮完成。

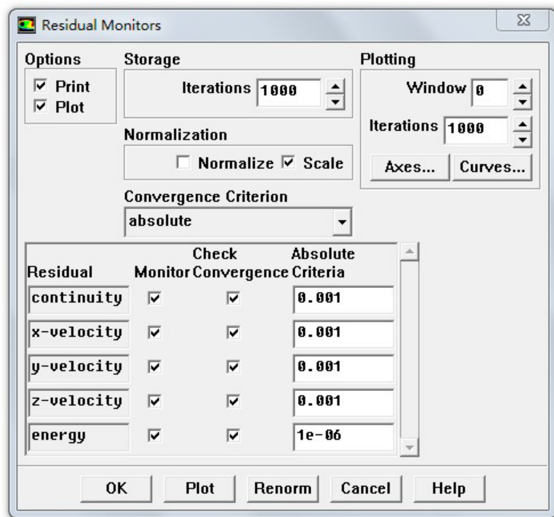


图 6-23　Residual Monitors 对话框

14 执行 Solve→Iterate…命令，将迭代次数定为 300，单击 Iterate 按钮，开始求解。

15 迭代完成之后，执行 Display→Contours 命令，选择 Contours of 下拉列表框中的 Properties 和 Viscocity，即可以得到由 UDF 定义的层流粘度图（见图 6-24）；选择 Velocity 和 Stram Functions 可显示凝固函数等值线图（见图 6-25）；还可以显示由 UDF 定义函数导出的速度云图（图 6-26）以及流域内的静温云图（见图 6-27）等。

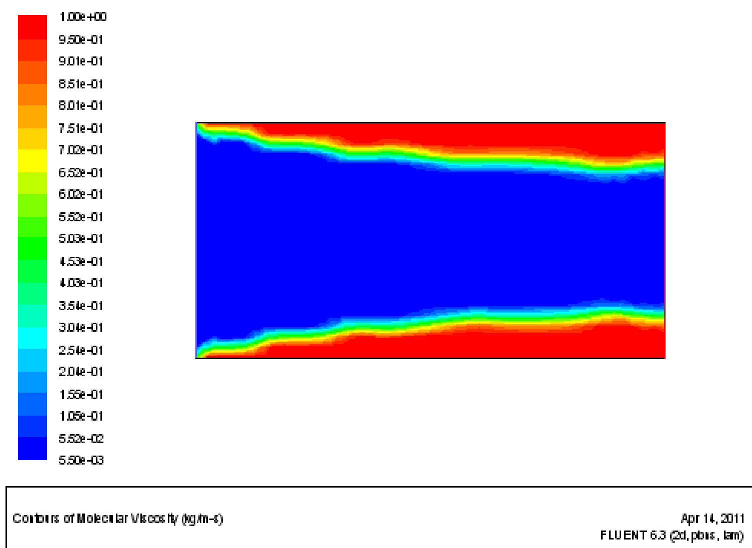


图 6-24　UDF 定义的层流粘度图



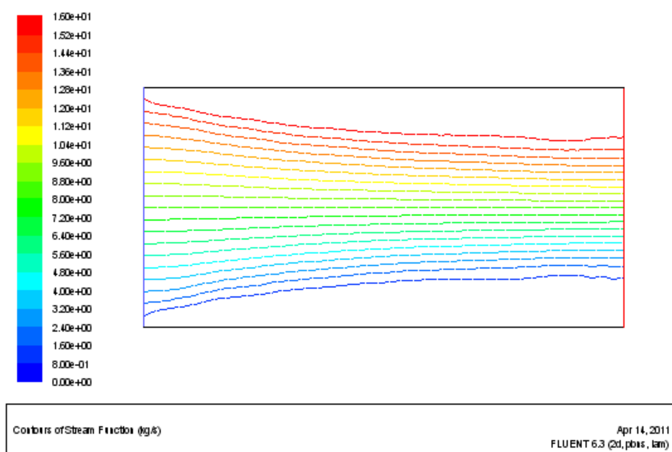


图 6-25　凝固函数等值线图

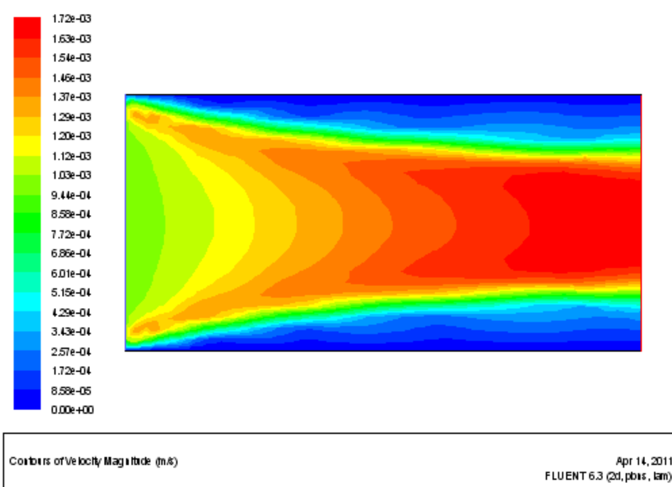


图 6-26　UDF 定义函数导出的速度云图

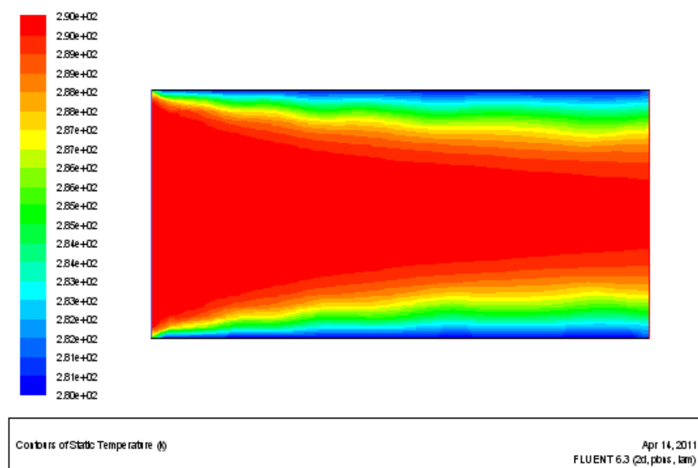


图 6-27　流域内的静温云图



16 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 channel.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 channel.dat。

17 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT6.3。

第 7 章　湍流模型模拟

当 FLUENT 软件中的模型包含有湍流时，需要激活相应模型和选项，并且提供湍流的边界条件。本章主要就湍流的特征以及湍流流动的相关模型进行研究和叙述，重点介绍 FLUENT 软件中常用的湍流模型应用方程，并通过具体的实例分析帮助读者了解湍流模型的使用，为以后与工程问题的结合奠定了基础。

7.1　湍流模型概述

FLUENT 软件中的湍流模型包括单方程（Spalart−Allmaras）模型、双方程模型（标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、可实现 $k-\varepsilon$ 模型）及 Reynolds 应力模型和大涡模拟，如图 7−1 所示。

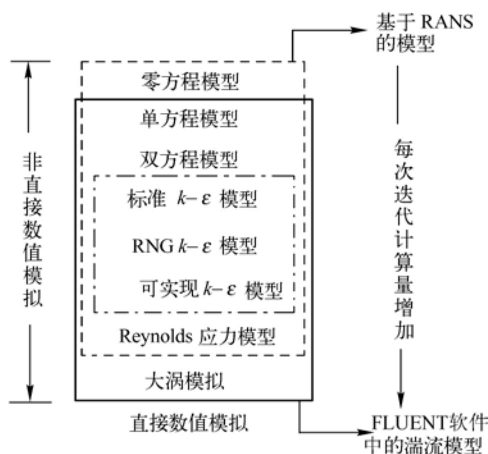
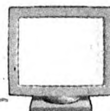


图 7−1　湍流模型详解

7.1.1　单方程模型

单方程模型求解变量是 $\tilde{\nu}$，表征出了近壁（粘性影响）区域以外的湍流运动粘性系数。$\tilde{\nu}$ 的输运方程为

$$\rho\frac{\mathrm{d}\tilde{\nu}}{\mathrm{d}t}=G_v+\frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\mu+\rho\tilde{\nu})\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right\}+C_{b2}\left(\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right)\right]-Y_v \qquad (7-1)$$



式中，G_v 是湍流粘性产生项；Y_v 是由于壁面阻挡与粘性阻尼引起的湍流粘性的减少；$\sigma_{\tilde{v}}$ 和 C_{b2} 是常数；$\tilde{v}$ 是分子运动粘性系数。

湍流粘性系数 $\mu_t = \rho\tilde{v}f_{v1}$，其中 f_{v1} 是粘性阻尼函数，定义为 $f_{v1} = \dfrac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}{}^3}$，$\chi \equiv \dfrac{\tilde{v}}{v}$。而湍流粘性产生项 G_v 模拟为 $G_v = C_{b1}\rho\tilde{S}\tilde{v}$，其中 $\tilde{S} \equiv S + \dfrac{\tilde{v}}{k^2d^2}f_{v2}$，$f_{v2} = 1 - \dfrac{\chi}{1+\chi f_{v1}}$，$C_{b1}$ 和 k 是常数，d 是计算点到壁面的距离；$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$，$\Omega_{ij} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i} - \dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$。在 FLUENT 软件中，考虑到平均应变率对湍流产生也起到很大作用，$S \equiv |\Omega_{ij}| + C_{\text{prod}}\min(0, |S_{ij}| - |\Omega_{ij}|)$，其中 $C_{\text{prod}}=2.0$，$|\Omega_{ij}| \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$，$|S_{ij}| \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$，平均应变率 $S_{ij} = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\partial u_j}{\partial x_i} + \dfrac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$。

在涡量超过应变率的计算区域计算出来的涡旋粘性系数变小。这适合涡流靠近涡旋中心的区域，那里只有“单纯”的旋转，湍流受到抑止。包含应变张量的影响更能体现旋转对湍流的影响。忽略了平均应变，估计的涡旋粘性系数产生项偏高。

湍流粘性系数减少项 Y_v 为 $Y_v = C_{w1}\rho f_w\left(\dfrac{\tilde{v}}{d}\right)^2$，其中 $f_w = g\left(\dfrac{1+C_{w3}^6}{g_6 + C_{w3}^6}\right)^{1/6}$，$g = r + C_{w2}(r^6 - r)$，$r \equiv \dfrac{\tilde{v}}{\tilde{S}k^2d^2}$，$C_{w1}$、$C_{w2}$、$C_{w3}$ 是常数，在计算 r 时用到的 $\tilde{S}$ 受平均应变率的影响。

上面的模型常数在 FLUENT 软件中默认值为 $C_{b1} = 0.1335$，$C_{b2} = 0.622$，$\sigma_{\tilde{v}} = 2/3$，$C_{v1} = 7.1$，$C_{w1} = C_{b1}/k^2 + (1+C_{b2})/\sigma_{\tilde{v}}$，$C_{w2} = 0.3$，$C_{w3} = 2.0$，$k = 0.41$。

7.1.2　标准 k-ε 模型

标准 k-ε 模型需要求解湍动能及其耗散率方程。湍动能输运方程是通过精确的方程推导得到的，但耗散率方程是通过物理推理，数学上模拟相似原形方程得到的。该模型假设流动为完全湍流，分子粘性的影响可以忽略。因此，标准 k-ε 模型只适合完全湍流的流动过程模拟。标准 k-ε 模型的湍动能 k 和耗散率 ε 方程形式如下：

$$\rho\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M \tag{7-2}$$

$$\rho\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{7-3}$$

式中，G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b 表示由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M 表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响。湍流粘性系数 $\mu_t = \rho C_\mu\dfrac{k^2}{\varepsilon}$。

在 FLUENT 软件中，作为默认值常数，C_{1z}=1.44，C_{2z} =1.92，C_{3z} =0.09，湍动能 k 与耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 σ_k=1.0，σ_z=1.3。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
第 7 章 湍流模型模拟
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

7.1.3 重整化群 k−ε 模型

重整化群（RNG）k−ε 模型是对瞬时的 Navier−Stokes 方程用重整化群的数学方法推导出来的模型。模型中的常数与标准 k−ε 模型不同，而且方程中也出现了新的函数或者项。其湍动能与耗散率方程与标准 k−ε 模型有相似的形式。

$$\rho\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\alpha_k\mu_{\mathrm{eff}})\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{7-4}$$

$$\rho\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\alpha_\varepsilon\mu_{\mathrm{eff}})\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R \tag{7-5}$$

式中，G_k表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b表示由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响，这些参数与标准k−ε模型中相同。α_k和α_ε分别是湍动能k和耗散率ε的有效湍流普朗特数的倒数。湍流粘性系数计算公式为

$$\mathrm{d}\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right)=1.72\frac{v}{\sqrt{v^3-1-Cv}}\mathrm{d}v \tag{7-6}$$

式中，$v=\mu_{\mathrm{eff}}/\mu$；$C_v\approx 100$。

对于前面方程的积分，可以精确到有效Reynolds数（涡旋尺度）对湍流输运的影响，这有助于处理低Reynolds数和近壁流动问题的模拟。对于高Reynolds数，式（7−6）方程可以给出：$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$，$C_\mu=0.0845$。这个结果非常有意思，和标准$k$−$\varepsilon$模型的半经验推导给出的常数$C_\mu$=0.09 非常近似。在FLUENT软件中，如果是默认设置，则用重整化群k−ε模型时是针对的高Reynolds数流动问题。如果对低Reynolds数问题进行数值模拟，则必须进行相应的设置。

7.1.4 可实现 k−ε 模型

可实现 k−ε 模型的湍动能及其耗散率输运方程为

$$\rho\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{7-7}$$

$$\rho\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+\rho C_1 S\varepsilon-\rho C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{v\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b \tag{7-8}$$

式中，$C_1=\max\left[0.43,\frac{\eta}{\eta+5}\right]$，$\eta=Sk/\varepsilon$。

在上述方程中，G_k表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生；G_b表示由于浮力影响引起的湍动能产生；Y_M表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响；$C_{2\varepsilon}$和$C_{1\varepsilon}$是常数；σ_k和σ_ε分别是湍动能及其耗散率的湍流普朗特数。在FLUENT软件中，作为默认值常数，$C_{1\varepsilon}$=1.44，$C_{2\varepsilon}$=1.9，σ_k=1.0，σ_ε=1.2。

该模型的湍流粘性系数与标准k−ε模型相同。不同的是，粘性系数中的C_μ不是常数，而是通过公式计算得到



$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* K}{\varepsilon}}$$

其中，$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$，　$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$，$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} + 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$，$\Omega_{ij}$ 表示在角速度 ω_k 旋转参考系下的平均旋转张量率。模型常数 $A_0 = 4.04$，$A_s = \sqrt{6}\cos\phi$，$\phi = \frac{1}{3}\arccos(\sqrt{6}W)$

式中，$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S}$，$S \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$，$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$

从这些式子中发现，C_μ是平均应变率与旋度的函数。在平衡边界层惯性底层，可以得到C_μ=0.09，与标准k−ε模型中采用的常数一样。

该模型适合的流动类型比较广泛，包括有旋均匀剪切流、自由流（射流和混合层）、腔道流动和边界层流动。对以上流动过程模拟结果都比标准 k−ε 模型的结果好，特别是可实现 k−ε 模型对圆口射流和平板射流模拟中，能给出较好的射流扩张角。

在双方程模型中，无论是标准k−ε模型、重整化群k−ε模型，还是可实现k−ε模型，3 个模型有类似的形式，即都有k和ε的输运方程。它们的区别在于：① 计算湍流粘性的方法不同；② 控制湍流扩散的湍流普朗特数不同；③ ε方程中的产生项和G_k关系不同，但都包含了相同的表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生G_k，表示由于浮力影响引起的湍动能产生G_b；表示可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响Y_M。

湍动能产生项

$$G_k = -\rho\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \tag{7-9}$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{P_{rt}}\frac{\partial T}{\partial x_i} \tag{7-10}$$

式中，P_{rt}是能量湍流普特朗数，对于可实现k−ε模型，默认设置值为 0.85；对于重整化群k−ε模型，P_{rt}=1/α，α=1/P_{rt} =$k/\mu C_p$。热膨胀系数 $\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_p$，对于理想气体，浮力引起的湍动能产生项变为

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho P_{rt}}\frac{\partial \rho}{\partial x_i} \tag{7-11}$$

▷▷▷ 7.1.5　Reynolds 应力模型

Reynolds 应力模型（RSM）是求解 Reynolds 应力张量的各个分量的输运方程。具体形式为

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho U_k \overline{u_i u_j}) = -\frac{\partial}{\partial x_k}[\rho\overline{u_i u_j u_k} + \overline{p(\delta_{kj}u_i + \delta_{ik}u_j)}] + \\
&\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\mu\frac{\partial}{\partial x_k}\overline{u_i u_j}\right) - \rho\left(\overline{u_i u_k}\frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k}\frac{\partial U_i}{\partial x_k}\right) - \rho\beta(g_i\overline{u_j\theta} + g_j\overline{u_i\theta}) + \\
&p\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - 2\mu\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}} - 2\rho\Omega_k(\overline{u_j u_m}\varepsilon_{ikm} + \overline{u_i u_m}\varepsilon_{jkm})
\end{aligned} \tag{7-12}$$

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
第 7 章 湍流模型模拟
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

式中，左边的第二项是对流项C_{ij}；右边第一项是湍流扩散项D_{ij}^{r}；第二项是分子扩散项D_{ij}^{L}；第三项是应力产生项P_{ij}；第四项是浮力产生项G_{ij}；第五项是压力应变项Φ_{ij}；第六项是耗散项ε_{ij}；第七项是系统旋转产生项F_{ij}。

在式（7−12）中，C_{ij}、D_{ij}^{L}、P_{ij}、F_{ij}不需要模拟，而D_{ij}^{r}、G_{ij}、Φ_{ij}、ε_{ij}需要模拟以封闭方程。下面简单对几个需要模拟项进行模拟。

D_{ij}^{r}可以用Delay和Harlow的梯度扩散模型来模拟，但这个模型会导致数值不稳定，在FLUENT软件中是采用标量湍流扩散模型：

$$D_{ij}^{T}=\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial\overline{u_i u_j}}{\partial x_k}\right)\tag{7−13}$$

式中，湍流粘性系数用 $\mu_t=\rho C_\mu\dfrac{k^2}{\varepsilon}$ 来计算，根据Lien和Leschziner，σ_k=0.82，这和标准k~ε模型中选取 1.0 有所不同。

压力应变项Φ_{ij}可以分解为 3 项，即

$$\Phi_{ij}=\Phi_{i,j,1}+\Phi_{ij,2}+\Phi_{ij}^{w}\tag{7−14}$$

式中，$\Phi_{i,j,1}$、$\Phi_{ij,2}$和Φ_{ij}^{w}分别是慢速项、快速项和壁面反射项。

浮力引起的产生项G_{ij}模拟为

$$G_{ij}=\beta\frac{\mu_t}{P_{rt}}\left(g_i\frac{\partial T}{\partial x_j}+g_j\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)\tag{7−15}$$

耗散张量ε_{ij}模拟为

$$\varepsilon_{ij}=\frac{2}{3}\delta_{ij}(\rho\varepsilon+Y_M)\tag{7−16}$$

式中，$Y_M=2\rho\varepsilon M_t^{\,2}$，$M_t$是马赫数；标量耗散率$\varepsilon$用标准$k$−$\varepsilon$模型中采用的耗散率输运方程求解。

7.1.6　大涡模拟

湍流中包含了不同时间与长度尺度的涡旋。最大长度尺度通常为平均流动的特征长度尺度。最小尺度为 Komogrov 尺度。大涡模拟（LES）的基本假设是：① 动量、能量、质量及其他标量主要由大涡输运；② 流动的几何和边界条件决定了大涡的特性，而流动特性主要在大涡中体现；③ 小尺度涡旋受几何和边界条件影响较小，并且各向同性。LES 过程中，直接求解大涡、小尺度涡旋模拟，从而使得网格要求比直接数值模拟（DNS）低。

LES 的控制方程是对 Navier−Stokes 方程在波数空间或者物理空间进行过滤得到的。过滤的过程是去掉比过滤宽度或者给定物理宽度小的涡旋，从而得到大涡旋的控制方程：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+u\frac{\partial\rho\overline{u}_i}{\partial x_i}=0\tag{7−17}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{u}_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\overline{u_i u_j})=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial\,\overline{u}_i}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial\,\overline{p}}{\partial x_j}-\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j}\tag{7−18}$$

式中，τ_{ij} 为亚网格应力，$\tau_{ij}=\rho\overline{u_i u_j}-\rho\overline{u}_i\overline{u}_j$。



很明显，上述方程与 Reynolds 平均方程很相似，只不过大涡模拟中的变量是过滤过的量，而非时间平均量，并且湍流应力也不同。

大涡模拟无论从计算机能力和方法的成熟程度来看，离实际应用还有较长距离，但湍流模型方面的研究重点已转向大涡模拟。估计在今后 10 年内，随着这一方法的成熟以及计算机能力进一步提高，大涡模拟将逐步成为湍流模拟的主要方法。

除了上述各类模型以外，有实用价值的还有改进的单方程模型，它对近壁流的模拟效果较好，以及简化的湍应力模型，即代数应力模型。从实用性来说，它们很有推广价值，尤其是代数应力模型，既能反映湍流的各向非同性，计算量又远小于湍应力模型。

7.2　湍流模型的设置

一个湍流流动问题的设置过程描述如下（注意，这里描述的过程仅包括对湍流模型本身的一些必要步骤，还需要照常设置一些其他模型、边界条件等）。

FLUENT 6.3 的湍流模型可通过执行 Define→Models→Viscous...命令来激活。弹出的 Viscous Model 对话框如图 7-2 所示。

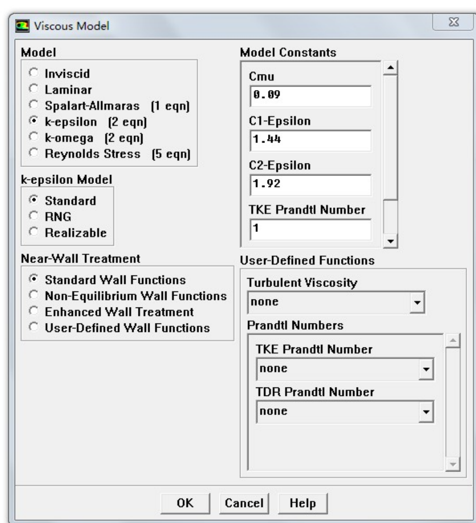


图 7-2　Viscous Model 对话框

根据所要解决的问题选择 k-epsilon[2 eqn]（k-ε）模型。k-ε 模型分为标准（Standard）、重组（RNG）、可实现（Realizable）3 种。如果选择 k-epsilon 模型，就在 k-epsilon Model 选项框中的 Standard、RNG、Realizable 3 个单选按钮中选择一个。如果选择 k-omega[z eqn]模型，就在 k-omega Model 选项框中的 Standard 和 SST 两个单选按钮中选择一个。大漩涡模型仅对三维有效。

如果流动包括壁面，而使用的是一种 k-ε 模型或雷诺应力模型（RSM），则需要从 Viscous Model 对话框的 Near-Wall Treatment 选项框下面的 3 个单选按钮中选择一个。

- Standard Wall Functions。
- Non-Equilibrium Wall Functions。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
第 7 章 湍流模型模拟
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

- Enhanced Wall Treatment。

如果选择的是 Spalart−Allmaras 模型，则下列选项是有用的。

- Vorticity-based production（基于漩涡的产出）。
- Strain/vorticity-based production（基于应变/漩涡的产出）。
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）。

如果选择的是标准的 k−ε 模型或是可实行的 k−ε 模型，则下列选项是有用的。

- Viscous heating（对耦合算法总是激活）。
- Inclusion of buoyancy effects on ε（包含浮力对 ε 的影响）。

如果选择的是 RNG k−ε 模型，则下列选项是有用的。

- Differential viscosity model（微分粘性模型）。
- Swirl modification（涡动修正）。
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）。
- Inclusion of buoyancy effects on ε（包含浮力对 ε 的影响）。

如果选择的是标准的 k−ε 模型，则下列选项是有用的。

- Transitional flows。
- Shear flow corrections。
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）。

如果选择的是剪切−应力传输 k−ε 模型，则下列选项是有用的。

- Transitional flows（过渡流）。
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）。

如果选择的是雷诺应力模型（RSM），则下列选项是有用的。

- Wall reflection effects on Reynolds stresses（壁面反射对雷诺应力的影响）。
- Wall boundary conditions for the Reynolds stresses from the k equation（雷诺应力的壁面边界条件来自 k 方程）。
- Quadratic pressure−strain model（二次的压力－应变模型）。
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）。
- Inclusion of buoyancy effects on ε（包含浮力对 ε 的影响）。

如果选择的是增强壁面处理（对 k−ε 模型和雷诺应力模型可用），则下列选项是有用的。

- Pressure gradient effects（压力梯度的影响）。
- Thermal effects（热影响）。

如果选择的是大漩涡模拟，则下列选项是有用的。

- Smagorinsky-Lilly model for the subgrid-scale viscosity。
- RNG model for the subgrid-scale viscosity。
- Viscous heating（对耦合算法总是激活）。

7.3　湍流模型实例——瀑布流过圆柱形石块时的流场

在水流中通常有一些桥墩、船桨、石块之类的障碍物对水流产生一定的影响。本例就用 FLUENT6.3 分析瀑布流过圆柱形石块时的流场。



1．实例概述

如图 7-3 所示，一个 10m×5m 的小瀑布垂直落下，在距崖顶 1m 处凭空伸出一个直径 20dm 的圆柱形石块，已知水流速度为 1m/s，现在分析突出的石块对水流的影响。

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 Geometry →Face →Create Real Rectangular Faces ，在弹出的面板中输入 Width：5 和 Height：10。单击 Apply 按钮，生成矩形面域。然后从级联按钮中单击 Circle，弹出 Circle 对话框。在 Radius 文本框中输入 0.1（代表小圆半径），单击 Apply 按钮，生成圆形截面，如图 7-4 所示。

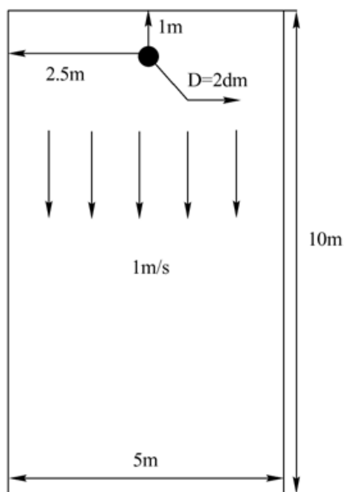


图 7-3　几何模型模拟

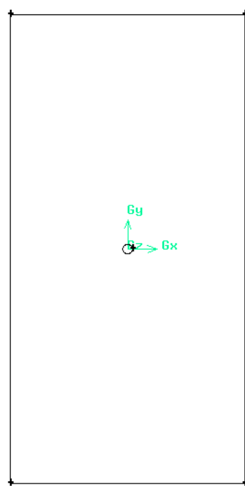


图 7-4　生成圆形截面

03 单击 Geometry →Faces →Move/Copy Faces ，出现 Move/Copy Faces 面板，如图 7-5 所示。单击 Faces 的 Pick 微调框右侧的上箭头按钮，从弹出的列表中单击小圆面域，回到 Move/Copy Faces 面板后，选中 Move 复选框和 Translate 复选框，本例中为默认值，在表示移动距离的 Global 和 Local 两组坐标中，Y 坐标均输入 4。单击 Apply 按钮后，小圆面上移 4m，如图 7-6 所示。

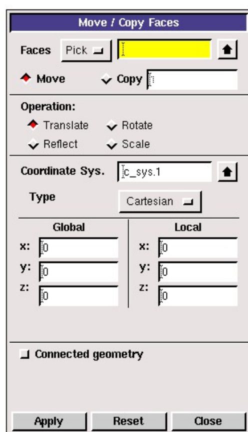


图 7-5　Move/Copy Faces 面板

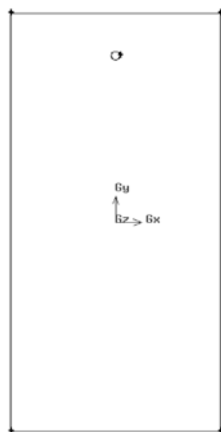


图 7-6　移动小圆后显示图

04 用鼠标右键单击 Face 命令组的 Subtract Real Faces，在弹出的级联按钮中单击 Subtract，弹出 Subtract Real Faces 面板，如图 7-7 所示。从 Face 下拉列表框中选择矩形面域，从 Subtract Faces 下拉列表框中选择小圆面。单击 Apply 按钮，就将小圆从矩形面域中减去，单击右下角的 Render Model，就可以看到剩下的部分，如图 7-8 所示。

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Edge→Mesh Edges，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色文本框中选中线段 Edge. 6，也就是小圆周线段，选择 Interval Count 的划分方式，并在左边文本框中输入 80，其他保持默认值，单击 Apply 按钮，完成对圆周的线网格的划分，如图 7-9 所示。

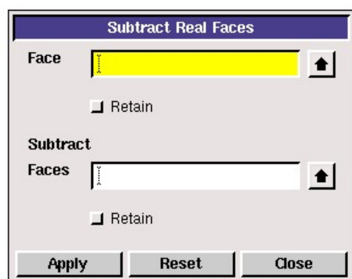


图 7-7 Subtract Real Faces 面板

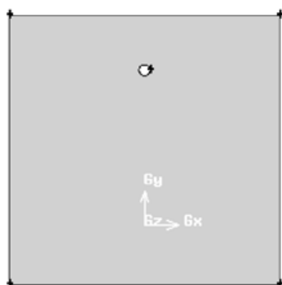


图 7-8 减去小圆面后剩下的面域

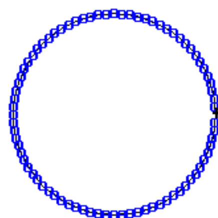


图 7-9 圆周的线网格的划分

02 同理，将矩形的上下两条线段也以 Interval Count 的方式划分 40 等份，左右两条线段划分 80 等份，如图 7-10 所示。

03 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板。在 Faces 下拉列表框中选择 Face.1，选择 Tri-pave 类型的划分方式，其他保持默认值，单击 Apply 按钮，完成面网格的划分，如图 7-11 所示。



图 7-10 矩形线网格

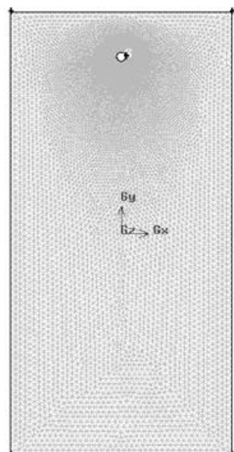


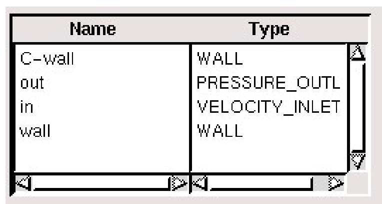
图 7-11 面网格的划分

04 单击 Zones→Specify Boundary Types，弹出 Specify Boundary Types 面板，如图 7-12 所示。选中 Add，单击 Entity 下的 Edges 按钮右侧的下箭头，弹出边界列表，选



中矩形上边界（可按住〈Shift〉键并单击需要线段来选择），单击 Type 下的按钮，在弹出的列表中选中 VELOCITY_INLET，然后在 Name 文本框中输入代表这条线段的名称 in，单击 Apply 按钮。同理，将矩形下边界指定为 PRESSURE_OUTLET，命名为 out；小圆壁面周长定义为 WALL，命名为 C-wall；剩下的线段都定义为 WALL，命名为 wall。

05 边界类型定义完后，需要将网格文件输出。执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 pb.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。注意，一定要保证 Slover 为 FLUENT5/6，才能够正常输出.msh 文件。



Name	Type
C-wall	WALL
out	PRESSURE_OUTL
in	VELOCITY_INLET
wall	WALL

图 7-12　Specify Boundary Types 面板

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 2d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 pb.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。检测成功后，执行 Grid→Scale…命令，弹出如图 7-13 所示的 Scale Grid 对话框，本例中不需要重新定义网格尺寸（GAMBIT 中默认单位为 m）。

03 执行 Define→Models→Solver…命令，采用默认的求解器设置，即选择压力基隐式，定常模型，采用绝对速度公式，如图 7-14 所示。单击 OK 按钮完成。

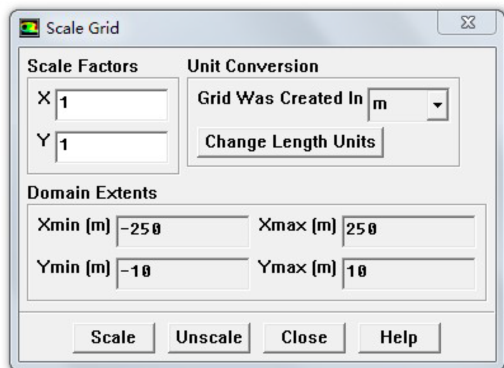


图 7-13　Scale Grid 对话框

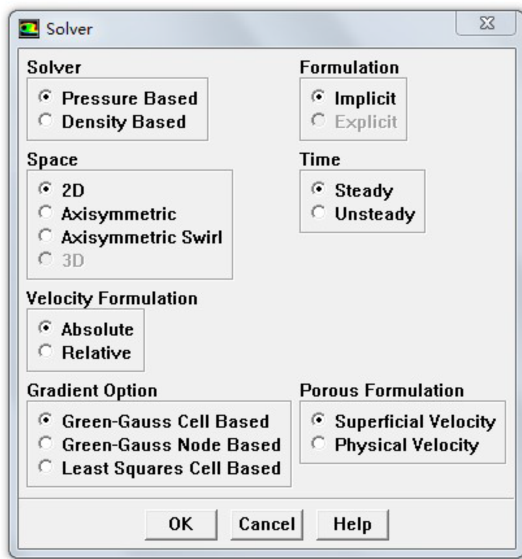


图 7-14　Slover 对话框

04 执行 Define→Models→Viscous…命令，在对话框中选择 k-epsilon[2 eqn]，在 k-epsilon Model 选项框中选择 Standard，在 Near-Wall Treatment 选项框中选择 Non-Equilibrium Wall Functions，其他保持默认值，如图 7-15 所示。单击 OK 按钮完成。

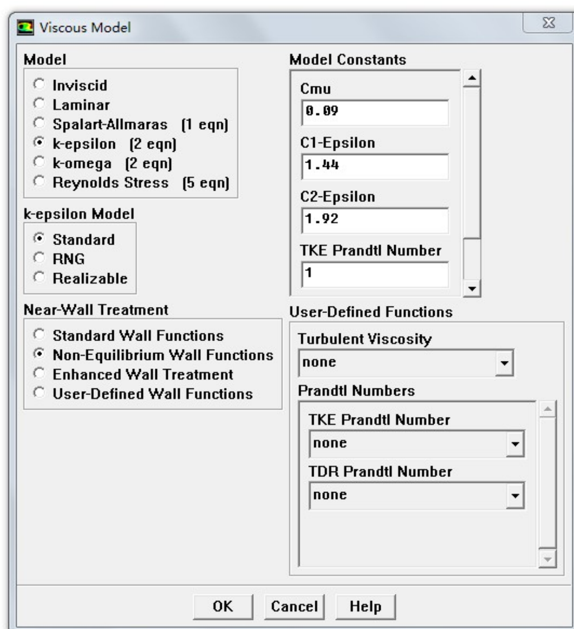


图 7-15　Viscous Model 对话框

05 执行 Define→Materials 命令，单击 Fluent Database 按钮，在 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中选择 water-liquid[h2o<l>]，如图 7-16 所示。单击 Copy 和 Close 按钮。在 Materials 对话框的 Fluent Fluid Materials 列表框中选择 water-liquid[h2o<l>]，单击 Change/Create 按钮，如图 7-17 所示。

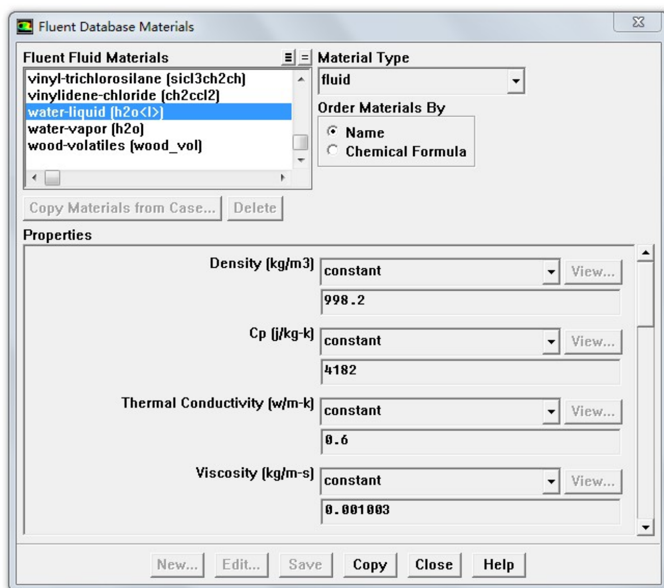


图 7-16　Fluent Database Materials 对话框

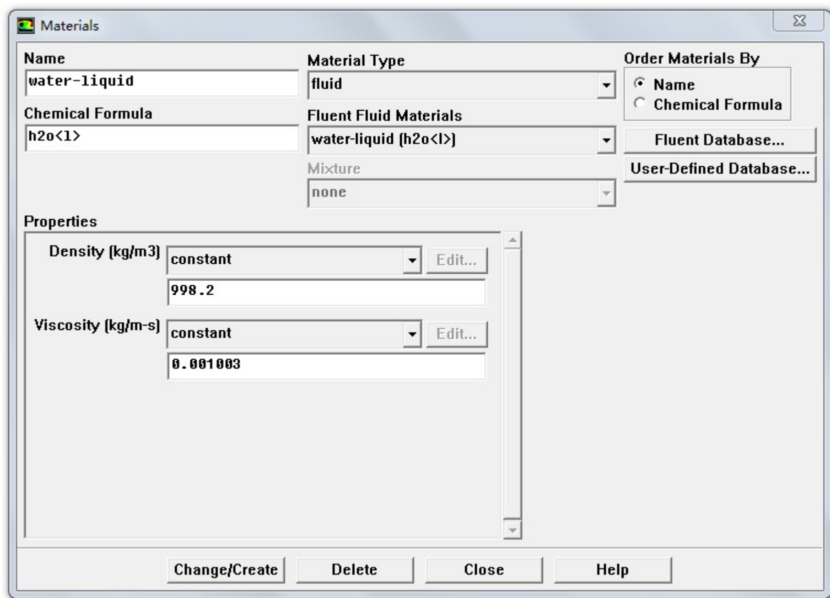


图 7-17　Materials 对话框

06 执行 Define→Operating Conditions...命令，弹出 Operating Conditions 对话框，如图 7-18 所示。选择 Gravity，重力加速度填写-9.81。

07 执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，如图 7-19 所示。

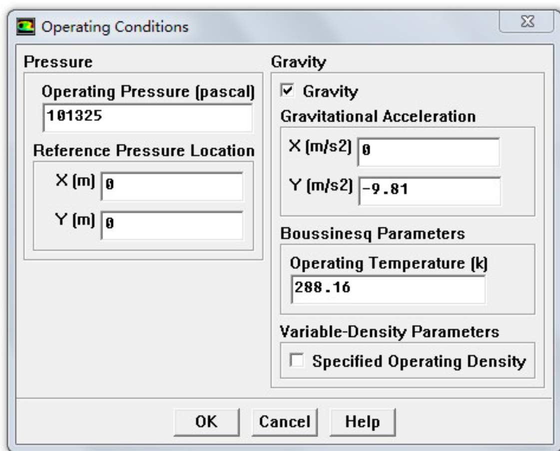


图 7-18　Operating Condition 对话框

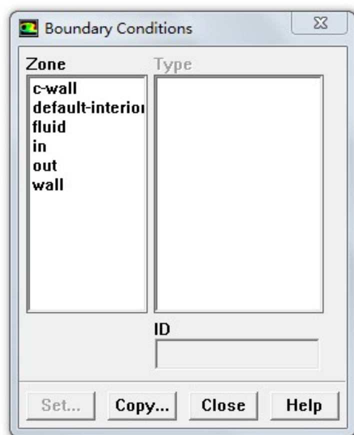


图 7-19　Boundary Conditions 对话框

08 在列表中选择 fluid，其类型（Type）为 fluid，单击 Set...按钮，选择 water-liquid，单击 OK 按钮。选择 in，单击 Set...按钮，弹出如图 7-20 所示的 Velocity Inlet 对话框，在 Momentum 标签中，选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame 下拉列表框选择 Absolute。Velocity Magnitude 值为 1m/s。

Turbulence 选项组的 Specification Method 下拉列表框选择 Intensity and Hydraulic Diameter，Turbulent Intensity 值为 5，Hydraulic Diameter 值为 0.5，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

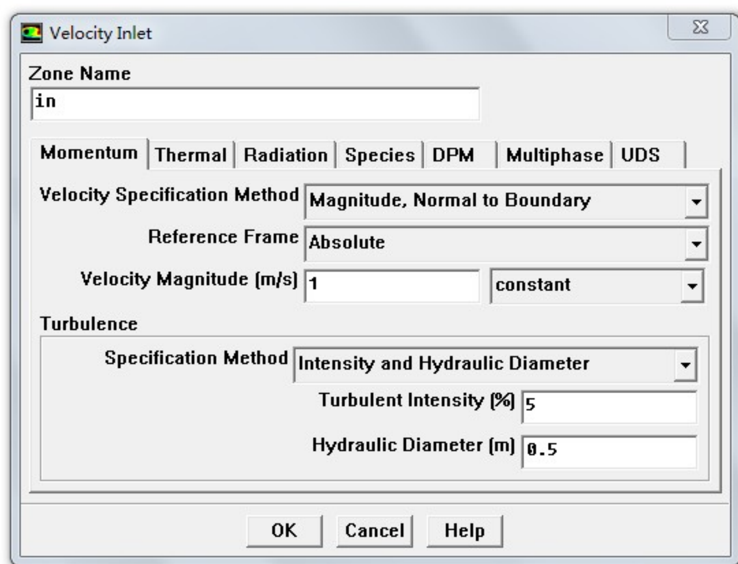


图 7-20　Velocity Inlet 对话框

09 回到 Boundary Conditions 对话框，选择 out，单击 Set…按钮，出现如图 7-21 所示的 Pressure Outlet 对话框。Turbulence 选项组的 Specification Method 下拉列表框选择为 Intensity and Hydraulic Diameter，Backflow Turbulent Intensity 值为 5，Backflow Hydraulic Diameter 值为 0.5，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

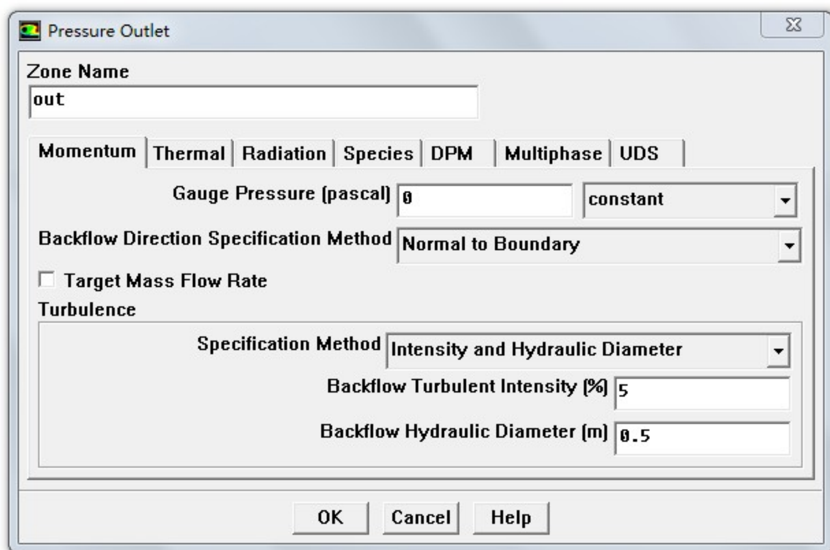


图 7-21　Pressure Outlet 对话框



10 执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出 Solution Controls 对话框，保持默认值，如图 7-22 所示。单击 OK 按钮完成。

11 执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在弹出的 Solution Initialization 对话框中选择 in，对进口进行初始化，如图 7-23 所示。顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

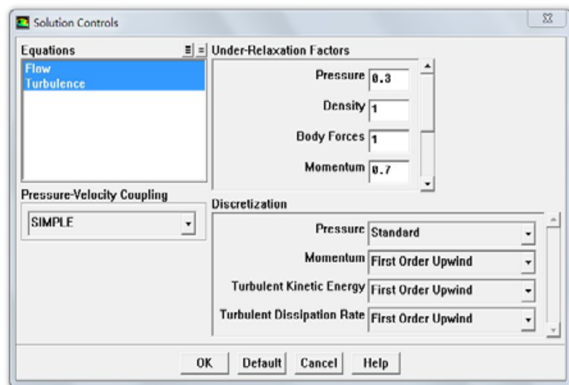


图 7-22　Solution Controls 对话框

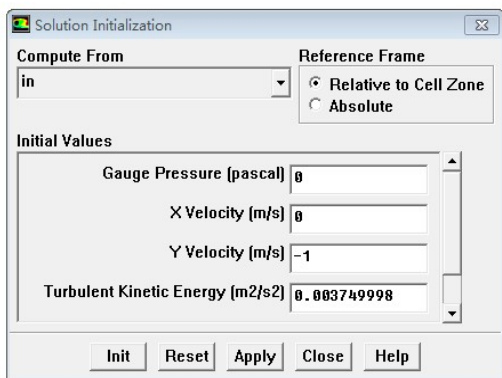


图 7-23　Solution Initialization 对话框

12 执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，其他变量保持默认值，如图 7-24 所示。

13 设置参考值。执行 Report→Reference Values...命令，在 Compute From 下拉列表框中选择 in，如图 7-25 所示。单击 OK 按钮完成。

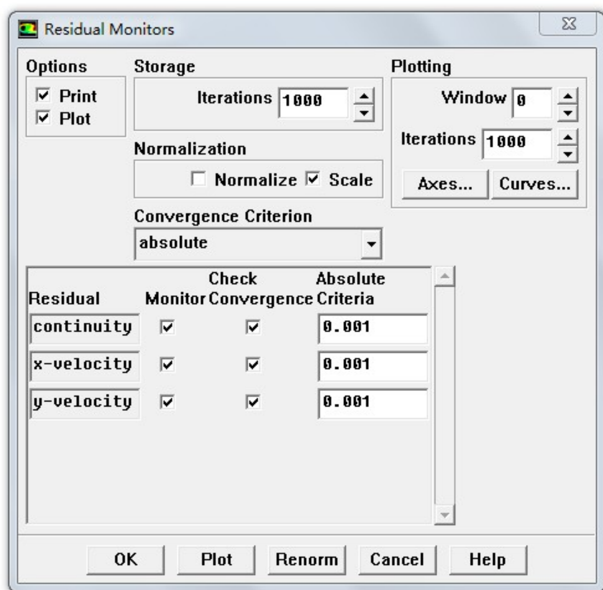


图 7-24　Residual Monitors 对话框

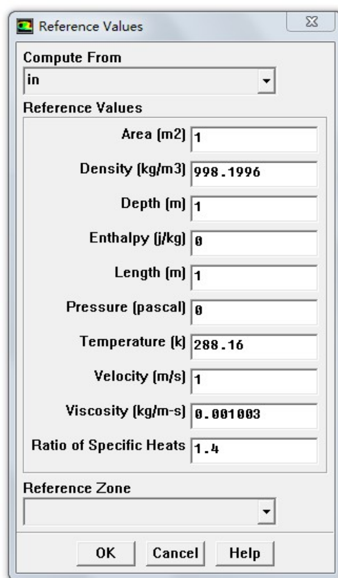


图 7-25　Reference Values 对话框

14 执行 Solve→Iterate...命令，设置 Number of Iterations 为 400，如图 7-26 所示。单击 Iterate 按钮开始求解。

15 执行 Display→Contours...命令，在 Contours of 下拉列表框中选择 Pressure，并勾选 Filled，如图 7-27 所示。单击 Display 按钮，显示压强分布云图，如图 7-28 所示。选择 Velocity，则显示速度分布云图，如图 7-29 所示。

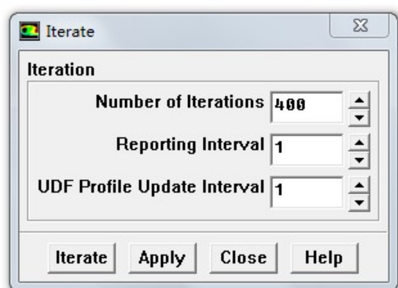


图 7-26　Iterate 对话框

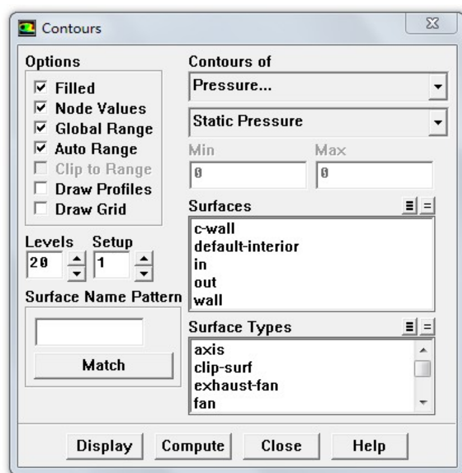


图 7-27　Contours 对话框

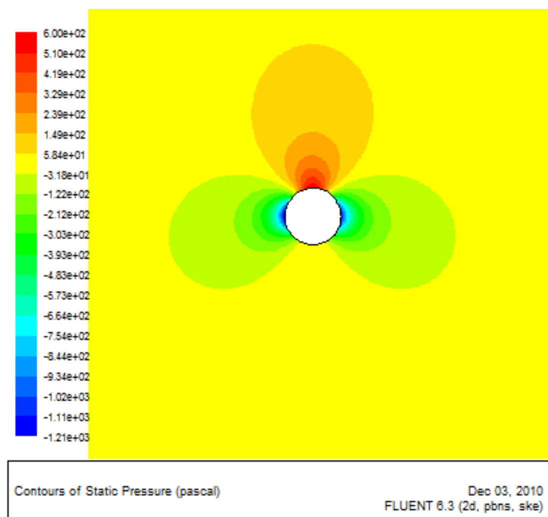


图 7-28　压强分布云图

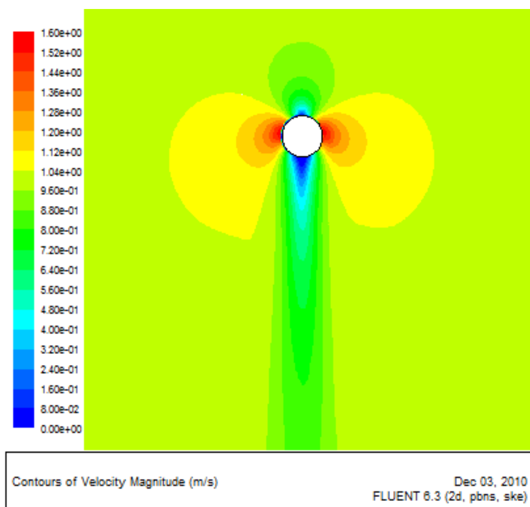


图 7-29　速度分布云图

16 执行 Display→Vectors...命令，单击 Display 按钮，如图 7-30 所示。得到速度矢量图，如图 7-31 所示。

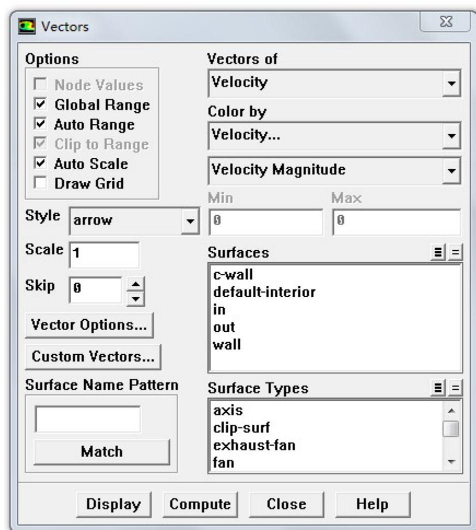


图 7-30　Vetors 对话框

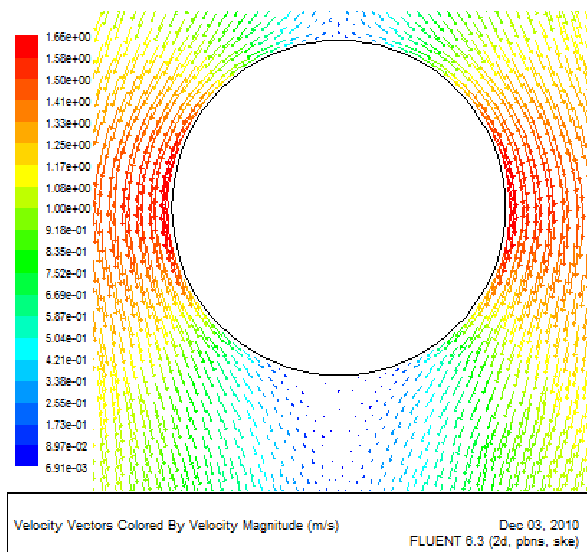


图 7-31　速度矢量图

17 执行 Plot→XY Plot…命令，弹出如图 7-32 所示的 Solution XY Plot 对话框，在 Y Axis Function 下拉列表框中选择 Pressure 和 Pressure Coefficient，并选中 Surfaces 列表框中的 c-wall，其他保持默认值，单击 Plot 按钮，即出现表面压力散点图，如图 7-33 所示。

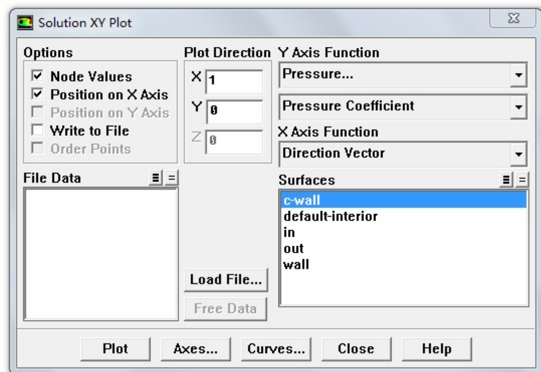


图 7-32　Solution XY Plot 对话框

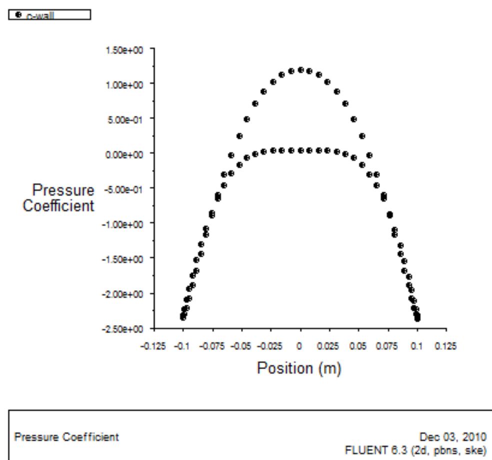


图 7-33　表面压力散点图

18 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 pb.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 pb.dat。

19 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。



第 8 章　多相流模型模拟

相指在流场或者位势场中，具有相同的边界条件和动力学特性的同类物质，一般分为固态、液态、气态。在多相流系统中，相的概念具有更为广泛的意义。在多相流动中，所谓的“相”可以定义为具有相同类别的物质，该类物质在所处的流动中具有特定的惯性响应并与流场相互作用。自然界和工程问题中会遇到大量的多相流动。

多相流模型包括液-气或者液-液两相流、气-固两相流、液-固两相流以及三相流，如具有泥浆流、气泡，液滴，或颗粒负载流、分层自由面流动、气动输运、水力输运或泥浆流、沉降以及流化床等流动模式。本章中详细介绍了多相流模型及其在工程中的应用。

▷▷ 8.1　FLUENT 软件中的多相流模型

FLUENT 软件提供了 3 种主要模型，包括 VOF 模型（Volume of Fluid Model）、混合模型（Mixture Model）、欧拉模型（Eulerian Model）。

▷▷▷ 8.1.1　VOF 模型

所谓 VOF 模型，是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法。当需要得到一种或多种互不相融流体间的交界面时，可以采用这种模型。在 VOF 模型中，不同的流体组分共用着一套动量方程，计算时在全流场的每个计算单元内，都记录下各流体组分所占有的体积率。VOF 模型的应用例子包括分层流、自由面流动、灌注、晃动、液体中大气泡的流动、水坝决堤时的水流、对喷射衰竭（Jet Breakup）（表面张力）的预测以及求得任意液-气分界面的稳态或瞬时分界面。

在 FLUENT 软件应用中，VOF 模型具有一定的局限。

- VOF 模型只能使用压力基求解器。
- 所有的控制容积必须充满单一流体相或者相的联合；VOF 模型不允许在空的区域中没有任何类型的流体存在。
- 只有一相是可压缩的。
- 计算 VOF 模型时不能同时计算周期流动问题。
- VOF 模型不能使用二阶隐式的时间格式。
- VOF 模型不能同时计算组分混合和反应流动问题。
- 大涡模拟紊流模型不能用于 VOF 模型。
- VOF 模型不能用于无粘流。



- VOF 模型不能用于并行计算中追踪粒子。
- 壁面壳传导模型不能和 VOF 模型同时计算。

此外，在 FLUENT 软件中 VOF 公式通常用于计算时间依赖解，但是对于只关心稳态解的问题，它也可以执行稳态计算。稳态 VOF 计算是敏感的，只有当解是独立于初始时间并且对于单相有明显的流入边界时才有解。例如，在旋转的杯子中自由表面的形状依赖于流体的初始水平，这样的问题必须使用非定常公式，而渠道内顶部有空气的水的流动和分离的空气入口可以采用稳态公式求解。

8.1.2　Mixture 模型

Mixture 模型可用于两相流或多相流（流体或颗粒）。因为在 Eulerian 模型中，各相被处理为互相贯通的连续体，Mixture 模型求解的是混合物的动量方程，并通过相对速度来描述离散相。Mixture 模型的应用包括低负载的粒子负载流、气泡流、沉降以及旋风分离器。Mixture 模型也可用于没有离散相相对速度的均匀多相流。

Mixture 模型是 Eulerian 模型在几种情形下的很好替代。当存在大范围的颗粒相分布或者界面的规律未知或者它们的可靠性有疑问时，完善的多相流模型是不切实可行的。当求解变量的个数小于完善的多相流模型时，像 Mixture 模型这样简单的模型能和完善的多相流模型一样取得好的结果。

在 FLUENT 软件应用中，Mixture 模型具有一定的局限。

- Mixture 模型只能使用压力基求解器。
- 只有一相是可压缩的。
- 计算 Mixture 模型时不能同时计算周期流动问题。
- 不能用于模拟融化和凝固的过程。
- Mixture 模型不能用于无粘流。
- 在模拟气穴现象时，若湍流模型为大涡模拟模型，则不能使用 Mixture 模型。
- 在多重参考系（MRF）与 Mixture 模型同时使用时，不能使用相对速度公式。
- 不能和固体壁面的热传导模拟同时使用。
- 不能用于并行计算和颗粒轨道模拟。
- 组分混合和反应流动的问题不能和 Mixture 模型同时使用。
- Mixture 模型不能使用二阶隐式的时间格式。

此外，Mixture 模型的缺点有界面特性包括不全、扩散和脉动特性难于处理等。

8.1.3　Eulerian 模型

Eulerian 模型是 FLUENT 软件中最复杂的多相流模型。它建立了一套包含有 n 个参数的动量方程和连续方程来求解每一相。压力项和各界面交换系数是耦合在一起的。耦合的方式依赖于所含相的情况，颗粒流（液-固）的处理与非颗粒流（液-液）是不同的。对于颗粒流，可应用分子运动理论来求得流动特性。不同相之间的动量交换也依赖于混合物的类别。通过 FLUENT 软件中的客户自定义函数（User-defined Functions），可以自己定义动量交换的计算方式。Eulerian 模型的应用包括气泡柱、上浮、颗粒悬浮以及流化床等情形。

除了以下的限制外，在 FLUENT 软件中所有其他的可利用特性都可以在 Eulerian 模型

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
第 8 章 多相流模型模拟
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

中使用。

- 只有 k–ε 模型能用于紊流。
- 颗粒跟踪仅与主相相互作用。
- 不能同时计算周期流动问题。
- 不能用于模拟融化和凝固的过程。
- Eulerian 模型不能用于无粘流。
- 不能用于并行计算和颗粒轨道模拟。
- 不允许存在压缩流动。
- Eulerian 模型中不考虑热传输。
- 相同的质量传输只存在于气穴问题中，在蒸发和压缩过程中是不可行的。
- Eulerian 模型不能使用二阶隐式的时间格式。

8.2 通用多相流模型的选择与使用

8.2.1 通用多相流模型的选择

解决多相流问题的第一步，就是挑选出最能符合实际流动的模式。一旦决定了采用何种模式最能符合实际的流动，就可以根据以下的原则来挑选最佳的模型。

- 对于体积率小于 10%的气泡、液滴和粒子负载流动，采用离散相模型。
- 对于离散相混合物或者单独的离散相体积率超出 10%的气泡、液滴和粒子负载流动，采用 Mixture 模型或者 Eulerian 模型。
- 对于活塞流，采用 VOF 模型。
- 对于分层/自由面流动，采用 VOF 模型。
- 对于气动输运，如果是均匀流动，则采用 Mixture 模型；如果是粒子流，则采用欧拉模型。
- 对于流化床，采用 Eulerian 模型模拟粒子流。
- 对于泥浆流和水力输运，采用混合物模型或 Eulerian 模型。
- 对于沉降，采用 Eulerian 模型。
- 对于更加一般的，同时包含若干种多相流模式的情况，应根据最感兴趣的流动特征，选择合适的流动模型。此时，由于模型只是对部分流动特征做了较好模拟，其精度必然低于只包含单个模式的流动。

Mixture 模型和 Eulerian 模型区别：如果离散相在计算域分布较广，则采用 Mixture 模型；如果离散相只集中在一部分，则使用 Eulerian 模型；当考虑计算域内的 Interphase Drag Laws 时，Eulerian 模型通常比 Mixture 模型能给出更精确的结果；选择何种模型要从计算时间和计算精度上考虑。

8.2.2 通用多相流模型的设置

1．VOF 模型

在 FLUENT 软件中，执行 Define→Models→Multiphase...命令，弹出 Multiphase Model



对话框，如图 8-1 所示。选择 Volume of Fluid 单选按钮，即启用了 VOF 模型（若选用 Off 单选按钮，即不采用多相流模型）。

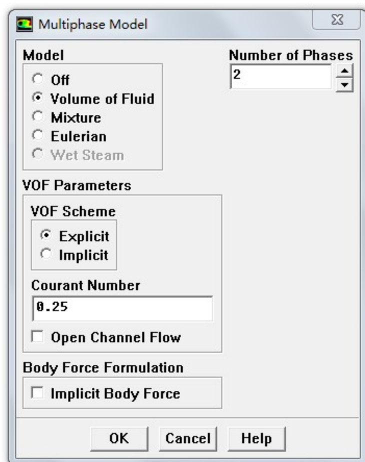


图 8-1　Multiphase Model 对话框的 VOF 模型

其中，VOF Parameters 选项组中的 VOF Scheme 可以选择显式（Explicit）和隐式（Implicit）。当选择显式时，还需要输入适当的 Courant Number，FLUENT 软件默认的是 0.25。在 Number of Phases 微调框中可以指定多相流模型计算的相数，最多为 20 相。选择 Open Channel Flow 复选框表示问题是明渠流。当涉及体积计算时，还需要选中 Implicit Body Force 复选框，通过解决压力梯度和动量方程中体积力的部分平衡提高了解的收敛。

2．Mixture 模型

在 Multiphase Model 对话框中选择 Mixture 单选按钮，如图 8-2 所示。其中，Mixture Parameters 下方的 Slip Velocity 复选框为滑移速度，若选中则考虑相间滑移，若不选则相间速度一致。

3．Eulerian 模型

在 Multiphase Model 对话框中选择 Eulerian 单选按钮，如图 8-3 所示。只需要定义模拟的相数即可。

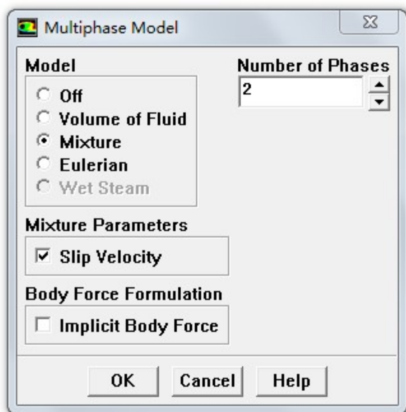


图 8-2　Multiphase Model 对话框的 Mixture 模型

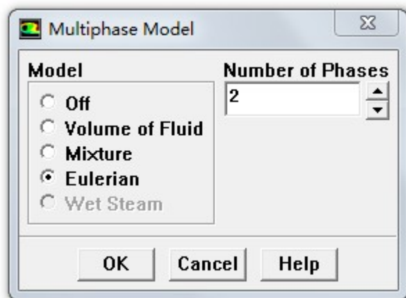


图 8-3　Multiphase Model 对话框的 Eulerian 模型

8.2.3 一般多相流问题的求解策略

1．VOF 模型

为了提高 VOF 模型求解的精度和收敛性，应做到如下几点：

（1）参考压力的位置应该移动到能减少压力计算的位置。默认的情况，参考压力的位置在单元中心或靠近点（0，0，0）。

（2）当用 FLUENT 软件进行任何模拟时，当欠松弛因子设置为 1 时，如果解出现不稳定、发散行为，则欠松弛因子必须减小。

（3）如果使用稳态隐式的 VOF 方案，为了提高稳定性，所有变量的欠松弛因子应设置在 0.2～0.5 之间。

2．Mixture 模型

（1）当选用滑流速度方程时，应选择较低的欠松弛因子开始混合模型的计算，建议采用 0.2 或更小。如果解显示出良好的收敛行为，则可逐渐增加这个值。

（2）对某些情况（如旋风分离），如果开始计算时不使用滑流速度方程，则会更快地获得解；一旦启动了 Mixture 模型，就可暂定这些方程无效而开始初始计算。

3．Eulerian 模型

为了提高收敛性，在求解完整欧拉多相流模型前可以先获得初始解。例如，启动和求解问题用 Mixture 模型（选或不选滑流速度都可）代替欧拉模型。然后启动欧拉模型，完成设置，采用 Mixture 模型的解作为起点继续计算。

8.3 多相流计算实例

下面通过两个实例练习一下 FLUENT 软件多相流模型功能的应用。

8.3.1 二维喷射流场模拟

在生活中经常会出现喷水现象，如浇花、灭火等，都是水流从一个小口喷出，形成一个大的喷射面，这里我们将用 FLUENT 软件模拟此类射流问题。

1．实例概述

如图 8-4 所示的集合区域，包含了喷水口（inlet）和出水口（outlet），其余部分为壁面（wall）。W=0.025m，H=0.2m，L=1m。

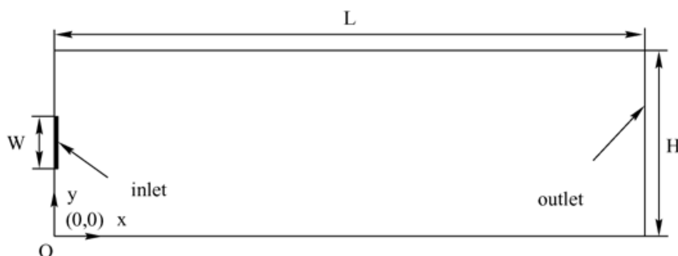


图 8-4 几何模型



2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 Geometry→Vertex→Create Real Vertex，在 Create Real Vertex 面板的 *x*、*y*、*z* 坐标文本框中输入数值，建立 6 个点（0，0，0）、（0，0.2，0）、（1，0.2，0）、（1，0，0）、（0，0.0875，0）、（0，0.1125，0）。

03 单击 Geometry→Edge→Create Straight Edge，在 Create Straight Edge 面板中选择需要构成线段的两个点，单击 Apply 按钮绘成线段，得到基本的几何模型，如图 8-5 所示：



图 8-5　基本的几何模型

04 单击 Geometry→Face→Create face from Wireframe，在 Create Face From Wireframe 面板的 Edges 黄色文本框中选取所需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何平面。

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Edge→Mesh Edges，打开 Mesh Faces 面板，选中对话框中的 Edges，选中 edge.6（喷口），设置 Interval count 为 100，单击 Apply 按钮，完成喷口直线的网格划分。同理，edge.3 设置为 50，edge.4 设置为 200。

02 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选中 face.1，保持默认值，单击 Apply 按钮，完成对模型面的网格划分，如图 8-6 所示。

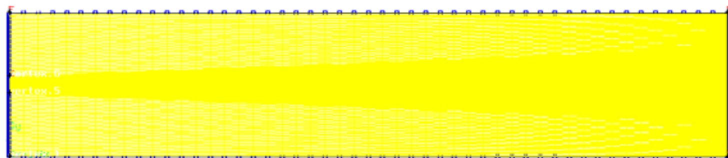


图 8-6　模型面的网格划分

03 单击Zones→Specify Boundary Types，在Specify Boundary Types面板中将edge.6定义为VELOCITY_INLET，命名为Inlet；将edge.4定义为PRESSURE_OUTLET，命名为outlet；其他定义为WALL，命名为wall。

04 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 jet.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4．求解计算

01 双击 FLUENT 6.3 图标，弹出 FLUENT Version 对话框，选择 2d（二维单精度）计算器，单击 Run 按钮启动 FLUENT 软件。

02 执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 jet.msh。

03 执行 Grid→Check 命令，检查网格文件。

04 执行 Define→Models→Solver...命令，在弹出的 Solver 对话框中选择 Unsteady，其他保持默认值。

05 执行 Define→Models→Multiphase… 命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中选择 VOF 模型，Number of phases 微调框中选择 2（有水和空气两相）。

06 执行 Define→Models→Viscous...命令，在弹出的 Viscous Models 对话框中选择标准 k−epsilon[2 eqn](*k*−*ε* 模型)，其他保持默认值。

07 执行 Define→Material 命令，从 FLUENT 软件自带的材料数据库中调用 water−liquid[h2o<1>]，依次单击 Change/Create 和 Close 按钮，完成材料的定义。

08 执行 Define→Operating Conditions 命令，弹出 Operating Conditions 对话框，勾选 Gravity 和 Specified Operating Density，将 Y 方向上的加速度改为−9.8，其他设置不变。

09 执行 Define→Phases，弹出 Phases 对话框，如图 8−7 所示。

10 选择 phase−1，在 Type 列表框中选择 Primary−phase，单击 Set…按钮，弹出 Primary Phase 对话框。

❶ 将 Name 文本框改为 air，在 Phase Material 下拉列表框中选择 air，如图 8−8 所示。单击 OK 按钮，即完成对第一相的设定。

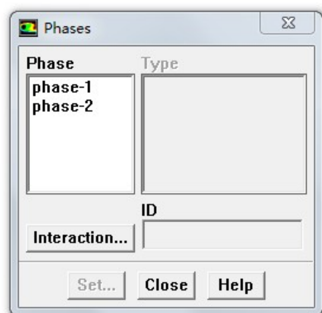


图 8−7 Phases 对话框



图 8−8 Primary Phase 对话框

❷ 回到 Phases 对话框，选择 phase−2，在 Type 列表框中选择 Secondary−phase，单击 set…按钮，弹出 Secondary Phase 对话框。将 Name 文本框改为 water，在 Phase Material 下拉列表框中选择 water−liquid，如图 8−9 所示。单击 OK 按钮，即完成对第二相的设定。

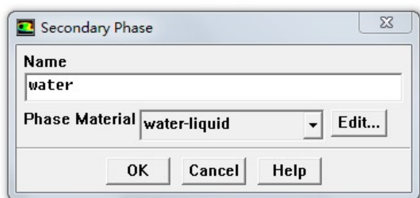


图 8−9 Secondary Phase 对话框

11 执行Define→Boundary Conditions…命令，弹出Boundary Conditions对话框。

❶ 设置Fluid流体区域的边界条件。在Boundary Conditions对话框的Zone列表框中选择fluid，单击set…按钮，弹出Fluid对话框，保持默认值，单击OK按钮。

❷ 设置inlet的边界条件。

1）在 Boundary Conditions 对话框的 Zone 列表框中选择 inlet，在 Phase 列表框中选择



mixture，单击 Set…按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 8-10 所示。将 Velocity Magnitude 设置为 1.5m/s，Turbulent Kinetic Energy 对应值为 0.01，Turbulent Dissipation Rate 对应值为 0.01。设置完毕后单击 OK 按钮。

2）回到 Boundary Conditions 对话框，在选择 inlet 的情况下，将 Phase 改为 water，单击 Set…按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，从中选择 Multiphase 标签，在 Volume Fraction 文本框中输入 1.0，如图 8-11 所示。意为进口处都是水，单击 OK 按钮完成进口处第二相的设置。

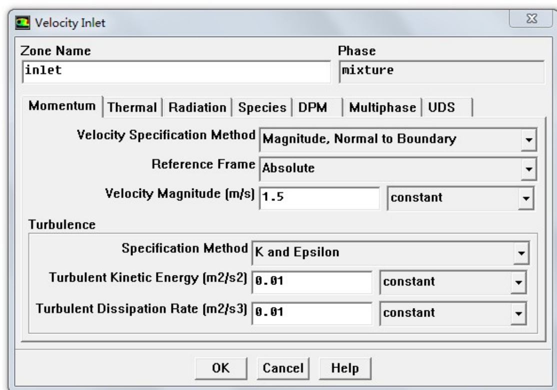


图 8-10　Velocity Inlet 对话框

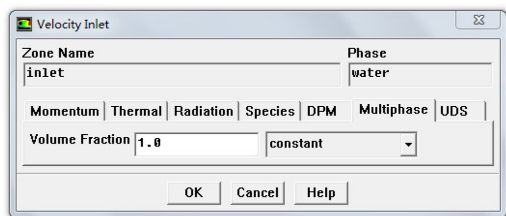


图 8-11　Velocity Inlet 对话框中 Phase 列表框选择 water

❸ 设置 outlet 的边界条件。

1）在 Boundary Conditions 对话框的 Zone 列表框中选择 outlet，在 Phase 列表框中选择 mixture，单击 Set…按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，Backflow Turbulent Kinetic Energy 对应值为 0.01，Backflow Turbulent Dissipation Rate 对应值为 0.01，如图 8-12 所示。设置完毕后单击 OK 按钮。

2）回到 Boundary Conditions 对话框，在选择 outlet 的情况下，将 Phase 改为 water，单击 Set…按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，从中选择 Multiphase 标签，在 Backflow Volume Fraction 文本框中设为 1.0，如图 8-13 所示。意为没有回流，水都从出口流出，单击 OK 按钮完成进口处第二相的设置。

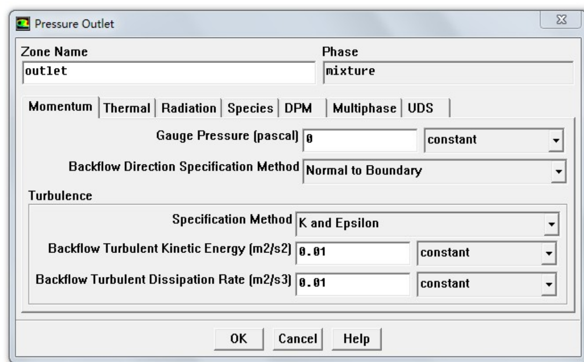


图 8-12　Pressure Outlet 对话框

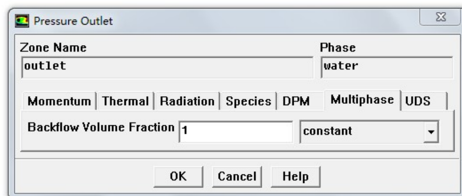


图 8-13　Pressure Outlet 对话框中 Phase 列表框选择 water

12 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出 Solution Controls 对话框，将 Momentum 设为 0.5，Turbulent Kinetic Energy 设为 0.5，Turbulent Dissipation Rate 设为 0.5，Turbulent Viscosity 设为 0.5。Momentum 选择 Second Order Upwind，Turbulent Kinetic Energy 选择 Second Order Upwind，Turbulent Dissipation Rate 选择 Second Order Upwind。在 Pressure-Velocity Coupling 选项组中选择 PISO，其他保持默认值，如图 8-14 所示。

13 对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialization 对话框中选择 inlet，在 Water Volume Fraction 中设置为 0，如图 8-15 所示。说明在初始状态时，矩形区域中充满了空气，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

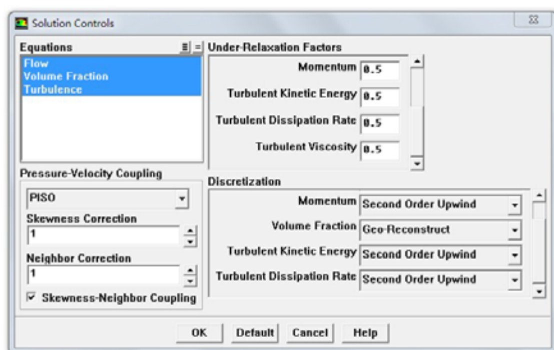


图 8-14 Solution Controls 对话框

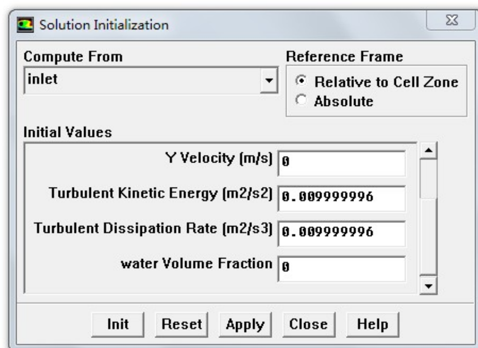


图 8-15 Solution Initialization 对话框

14 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，弹出如图 8-16 所示的 Residual Monitors 对话框，从中选中 Plot，以打开残差曲线图，Convergence 设置为 0.0001。

15 执行 Solve→Animate→Define 命令，弹出如图 8-17 所示的 Solution Animation 对话框，Animation Sequences 设置为 1，表示只对一个物理量进行录像。在显示的选项中，Name 文本框改为 jet，every 微调框选择 1，When 下拉列表框选择 Time step，单击 Define 按钮，弹出 Animation Sequence 对话框，如图 8-18 所示。

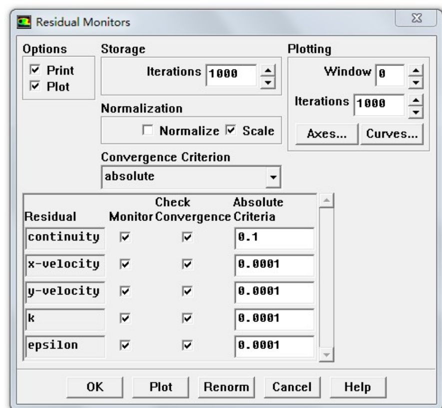


图 8-16 Residual Monitors 对话框

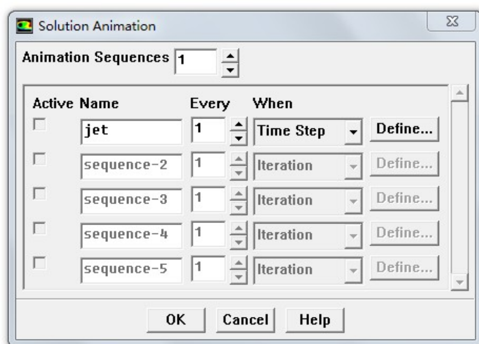


图 8-17 Solution Animation 对话框



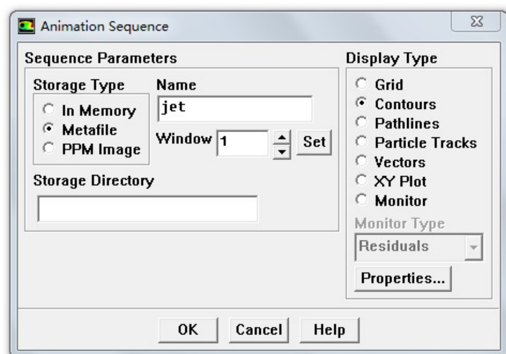


图 8-18　Animation Sequence 对话框

16 Windows 微调框中选择 1，在 Display Type 选项组中选择 Contours，这时会弹出 Contours 对话框，勾选 Filled，在 Contours of 下拉列表框中选择 Phases...，其他保持默认值，单击 Display 按钮，就出现了空气体积分布图。

17 执行 Solve→Iterate...命令，在弹出的 Iterate 对话框中设置 Time Step Size 为 0.001，Number of Times Steps 为 1000，Max Iterations per Time Step 为 2000，其他保持默认值，如图 8-19 所示。单击 Iterate 按钮即可开始求解。

18 迭代完成之后，执行 Display→Contours...命令，弹出如图 8-20 所示的 Contours 对话框。单击 Display 按钮，出现空气体积分数的显示图，如图 8-21 所示。

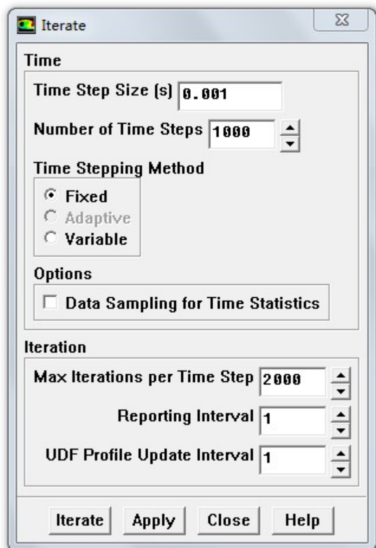


图 8-19　Iterate 对话框

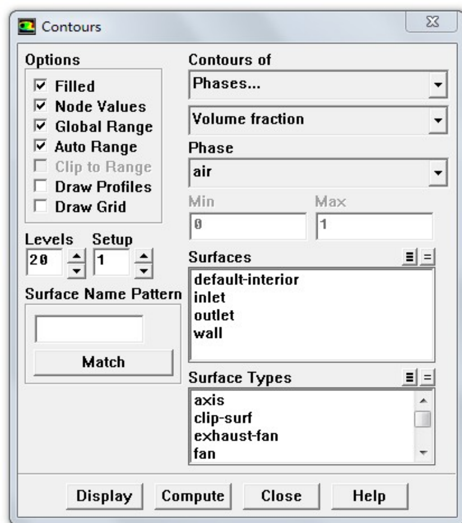


图 8-20　Contours 对话框

还可以设置某一截面上的速度矢量图。

19 执行 Display→Vectors...命令，弹出 Vectors 对话框，选中 Surface 中的所有选项，单击 Apply 按钮，即得到整个区域的速度矢量图，如图 8-22 所示。

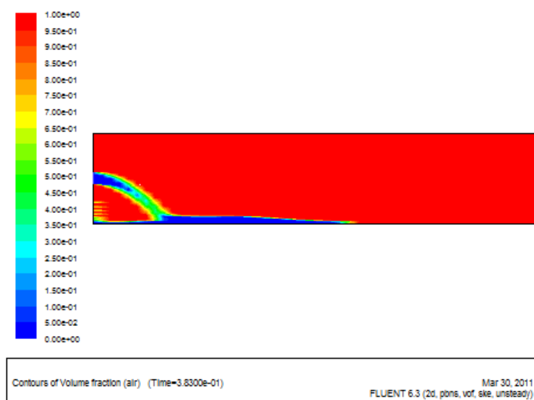


图 8-21　空气体积分数

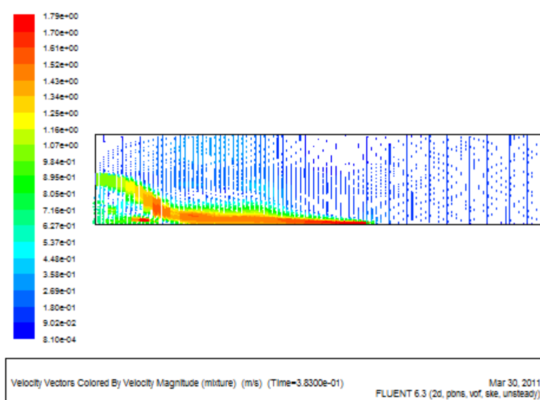


图 8-22　速度矢量图

20 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 jet.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 jet.dat。

21 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

8.3.2　水油混合物 T 形管流动模拟

1．实例概述

如图 8-23 所示的一个 T 形管，直径为 0.5 米，水和油的混合物从左端以 1m/s 的速度进入，其中油的质量分数为 80%。在交叉点处混合流分流，78%质量流率的混合流从下口流出，22%的质量流率的混合流从右端流出。

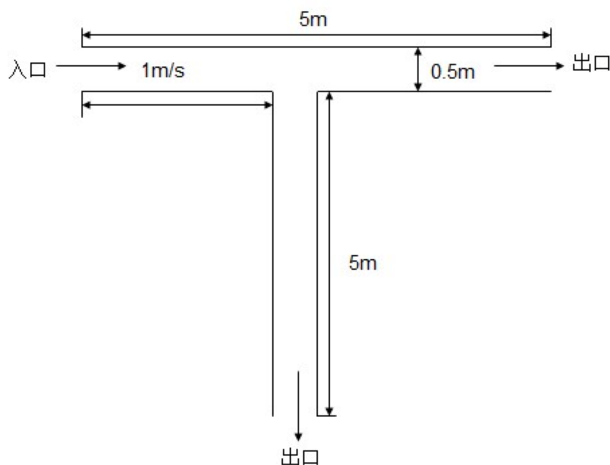


图 8-23　简单几何模型

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 Geometry →Face →Create Real Rectangular Face ，在 Width 文本框和



Height 文本框中分别输入 5 和 0.5，单击 Apply 按钮，生成水平方向的矩形流道。然后在 Width 文本框和 Height 文本框中分别输入 0.5 和 5，生成竖直方向上的矩形流道，如图 8-24 所示。

03 单击 Geometry→Face→Move/Copy Faces，在 Move/Copy Faces 面板中选择竖直方向上的矩形面，沿 Y 轴方向移动-2.75，得到 T 形几何流道。

04 单击 Geometry→Face→Unite Real Faces，将生成的两个矩形面合为一面，如图 8-25 所示。

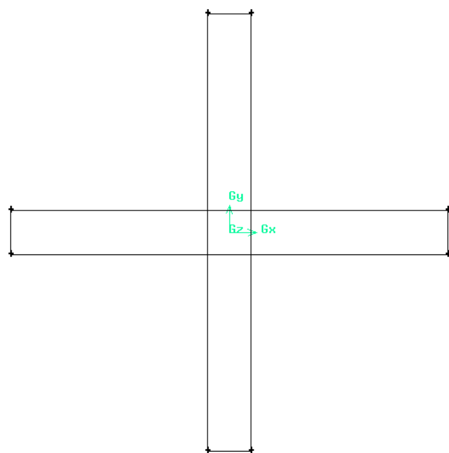


图 8-24　矩形流道

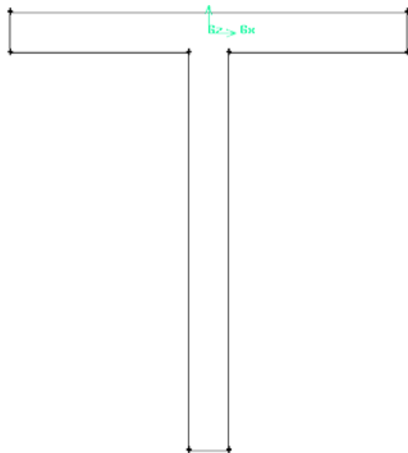


图 8-25　T 形流道几何示意图

3. 网格的划分

01 单击 Mesh→Faces→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选中生成的流道面，Interval Size 输入 0.05，单击 Apply 按钮，即生成面网格模型，如图 8-26 所示。

02 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中，流道左边线段定为 VELOCITY_INLET，命名为 in；流道右边线段定为 OUTFLOW，命名为 out-1；竖直方向上流道底端线段定为 OUTFLOW，命名为 out-2；剩下的线段定义为 WALL，命名为 wall。

03 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 mixture.msh，选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

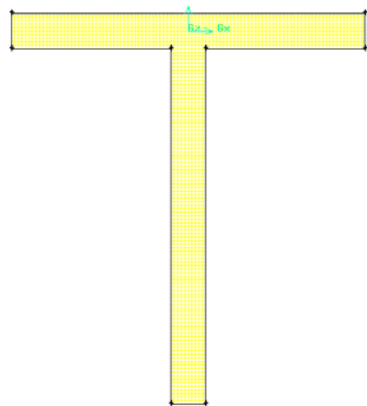


图 8-26　面网格模型

4. 求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 2d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 mixture.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，保持默认值，单击 OK

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
第 8 章 多相流模型模拟
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

按钮。

04 执行 Define→Models→Multiphase…命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中选择 Mixture，单击 OK 按钮。

05 执行 Define→Models→Viscous…命令，在弹出的 Viscous Model 对话框中选择 k-epsilon [2 eqn]，如图 8-27 所示。单击 OK 按钮完成。

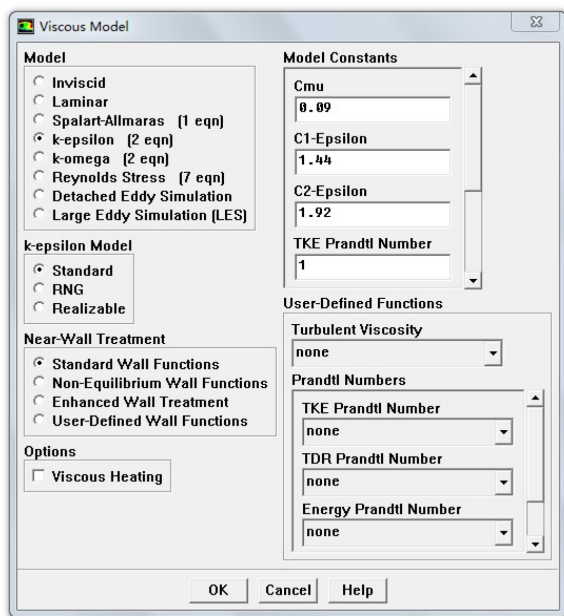


图 8-27 Viscous Model 对话框

06 执行 Define→Materials 命令，弹出 Materials 对话框，从中选择 water-liquid [h2o<l>]和 fuel-oil-liquid [c19h30<1>]，单击 Change/Create 按钮，完成对材料的定义。

07 执行 Define→Phases，弹出 Phases 对话框，选择 phase-1，在 Type 列表框中选择 Primary-phase，单击 Set…按钮，弹出 Primary Phase 对话框，将 Name 文本框改为 oil，在 Phase Material 下拉列表框中选择 fuel-oil-liquid，单击 OK 按钮，即完成对第一相的设定。

08 回到 Phases 对话框，选择 phase-2，在 Type 列表框中选择 Secondary-phase，单击 Set…按钮，弹出 Secondary Phase 对话框，将 Name 文本框改为 water，在 Phase Material 下拉列表框中选择 water-liquid，单击 OK 按钮，即完成对第二相的设定。

09 执行 Define→Operating Conditions 命令，弹出 Operating Conditions 对话框，勾选 Gravity，将 Y 方向上的加速度改为-9.81，单击 OK 按钮。

10 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。

❶ 设置 int 的边界条件。

1）在 Boundary Conditions 对话框的 Zone 列表框中选择 in，在 Phase 列表框中选择 mixture，单击 Set…按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，如图 8-28 所示。在 Momentum 标签的 Specification Method 下拉列表框中选择 Intensity and Hydraulic Diameter；Turbulent Intensity[%]文本框设置为 1，Hydraulic Diameter[m]文本框设置为 0.6，设置完毕后单击 OK 按钮。



2）回到 Boundary Conditions 对话框，在选择 in 的情况下，将 Phase 文本框改为 water，单击 Set...按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框。在 Momentum 标签的 Velocity Magnitude 文本框中输入 1，在 Muliphase 标签的 Volume Fraction 文本框中输入 0.2，单击 OK 按钮。同理，完成对 oil 相的设定。

❷ 设置 out 的边界条件。

在 Boundary Conditions 对话框的 Zone 列表框中选择 out-1，在 Phase 列表框中选择 mixture，单击 Set...按钮，弹出 outflow 对话框，在 Flow Rate Weighting 文本框中输入 0.78，单击 OK 按钮。然后选择 out-2，在 Flow Rate Weighting 文本框中输入 0.22，单击 OK 按钮，完成对 out 边界条件的设置。

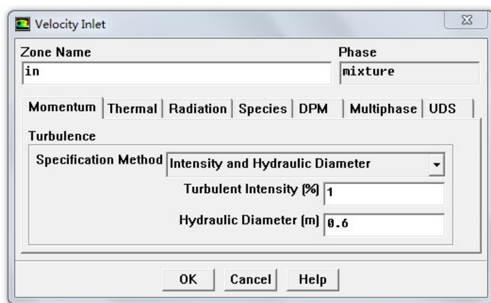


图 8-28　Velocity Inlet 对话框

11 执行 Solve→Control→Solution...命令，保持默认值，单击 OK 按钮。

12 执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，选择 in，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

13 执行 Solve→Monitors→Residual...命令，勾选 Plot，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

14 执行 Solve→Interate 命令，在 Number of Time Steps 文本框中输入 1000，单击 Iterate 按钮开始迭算。

15 迭代完成后，执行 Display→Contours...命令，得到混合流体的压强分布图和速度分布图，如图 8-29 和图 8-30 所示。

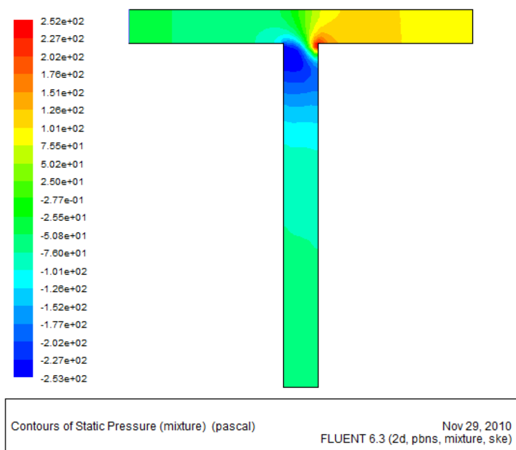


图 8-29　混合流体的压强分布图

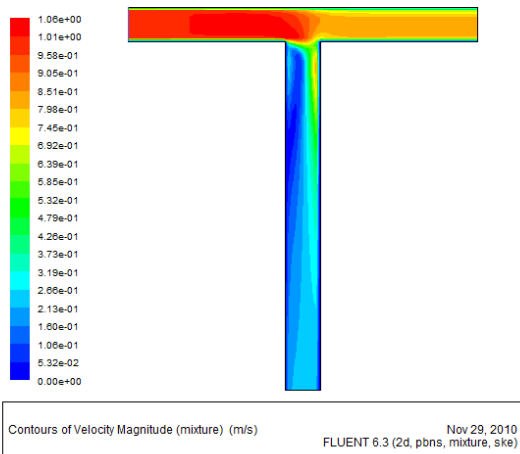


图 8-30　混合流体的速度分布图

16 执行 Display→Vectors...命令，显示混合流体的速度矢量图，如图 8-31 所示。

17 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data...命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 mixture.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 mixture.dat。

18 该模型也可用 Eulerian 模型来进行多相流计算。执行 Define→Models→Multiphase...命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中选择 Eulerian，单击 OK 按钮。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
第 8 章 多相流模型模拟
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
13 P254

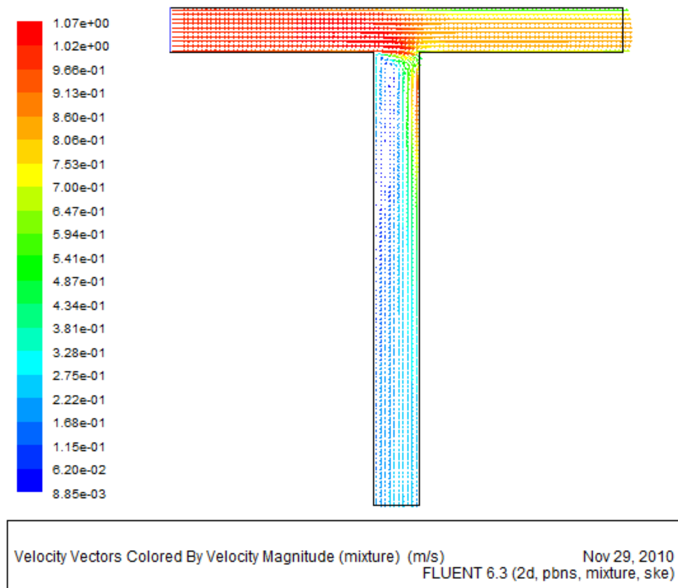


图 8-31　混合流体的速度矢量图

19 重新对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，选择 in，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

20 执行 Solve→Interate 命令，在 Number of Time Steps 中输入 1000，单击 Iterate 按钮开始迭算。

21 迭代完成后，执行 Display→Contours...命令，得到混合流体的欧拉模型压强分布图和速度分布图，如图 8-32 和图 8-33 所示。

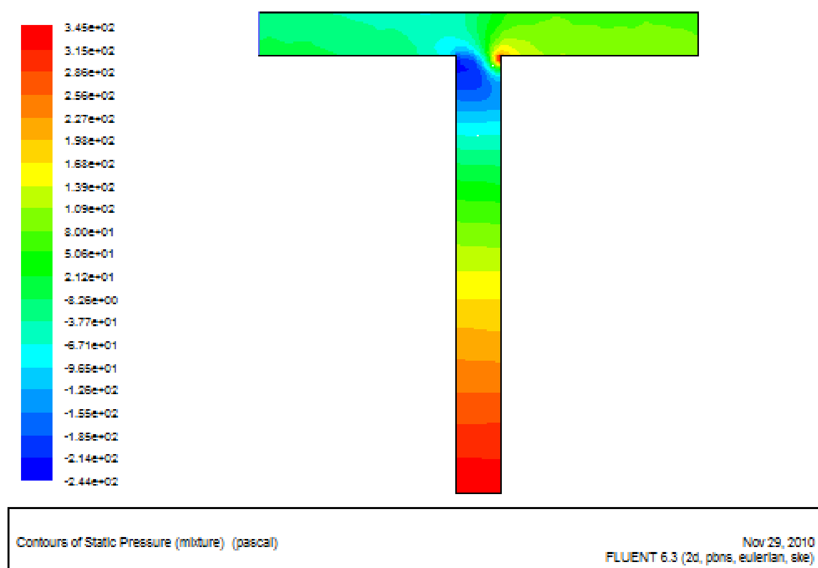


图 8-32　混合流体的欧拉模型压强分布图



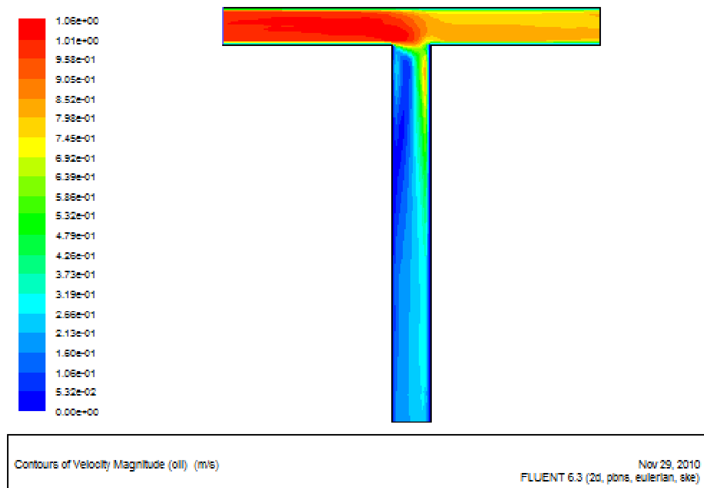


图 8-33　混合流体的欧拉模型速度分布图

22 执行 Display→Vectors…命令，显示混合流体的欧拉模型速度矢量图，如图 8-34 所示。

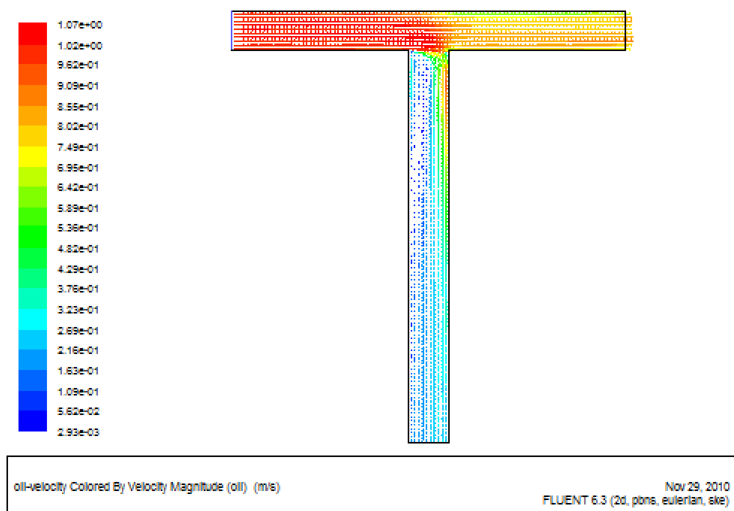


图 8-34　混合流体的欧拉模型速度矢量图

23 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 eulerian.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 eulerian.dat。

24 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

第 9 章 滑移网格模型模拟

本章主要介绍滑移网格模型的基本思想和设置方法，并通过一个实例展现滑移网格的设置与求解过程，帮助读者了解 FLUENT 软件求解移动区域流体流动问题，利用滑移网格模型分析相关的实际工程。

9.1 滑移网格模型概述

滑移网格是在多重参考系（MRF）和混合平面的基础上发展起来的，用来描述计算区域的运动。在滑移网格中，静止和转动部分之间的相对运动会引发瞬态交互效应。这些交互效应通常分为 3 种。

- 潜在作用：由于上游和下游压力波的传播导致的流动不稳定。
- 尾迹作用：由于上游叶片组的尾流传递至下流引起的流动不稳定。
- 冲击作用：在跨音或超音速流动中，由于激波冲击下游叶片组导致不稳定。

滑移网格技术可以处理非定常问题，这是它与 MRF 模型和混合面模型的最大区别。滑移网格技术通常处理带有周期性的问题，如涡轮机械中转子和定子的相互干扰问题，如图 9-1 所示。但是滑移网格也可以计算非周期性问题，如两列火车交错行驶过程中周围流场的变化。在不需要考虑转子和定子相互干扰的细节时，用 MRF 模型和混合面模型进行计算就可以获得相互干扰的平均效果，但是在需要考虑干扰过程的细节时，则必须使用滑移网格技术。滑移网格技术在计算中需要使用的系统资源比较大，因此在使用滑移网格技术时需要使用配置较高的计算机。

在滑移网格计算中，计算域至少包含两个以上存在相对运动的子域。每个运动子域至少有一个与相邻子域连接的交界面。原则上交界面形状是任意的，但在实际计算中，交界面的实际形状都设计为在滑移后相邻子域不能相互重叠的形状，或者说交界面上的运动速度必须与交界面相垂直。例如，在旋转机械问题中，交界面都设计成轴对称形式，包括圆锥面、圆柱面等形状如图 9-2 所示。在列车交错问题中，交界面则设计成平面等。

滑移网格技术中设定的交界面在计算过程中总是有一部分与相邻子域相连，而其余区域不与相邻子域相连。与相邻子域相连的区域被称为内部区域。与相邻子域不相连的区域，在平动问题中被称为壁面区域，在周期性流动问题中则被称为周期区域。在每次迭代结束后，FLUENT 软件都会重新计算内部区域的范围，将交界面的其余部分划定为壁面区域或周期性区域，并在壁面区域和周期性区域上设定相应的边界条件。在新的迭代步中，只计算内部区域上的通量。滑移网格计算中采用非正则网格技术，即交界面两侧子域在交界面上不共用网



格节点，因此内部区域不是用交界面两侧的网格面直接构成的，而是通过子域间的相对移动量重新计算得出内部区域的边界位置。

当期望获得转子–定子作用时间精确解时，则需要采用滑移网格进行瞬态流场计算。

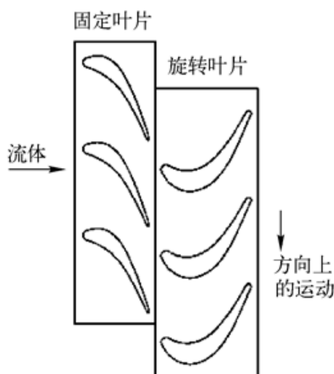


图 9–1　转子–定子的相互作用

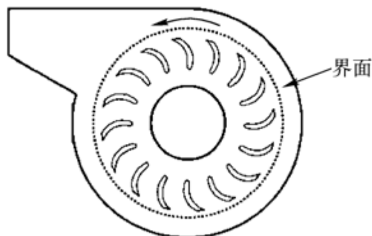


图 9–2　风机

9.2　滑移网格的设置

滑移网格的设置过程如下：

（1）在求解器面板中将计算类型设置为非定常。

（2）在边界条件面板中，将交界面的网格类型设置为 interface。在 Fluid 对话框和 Solid 对话框中，将移动区域的运动类型（Motion Type）设置为移动网格（Moving Mesh），并设定其移动速度，如图 9–3 所示。

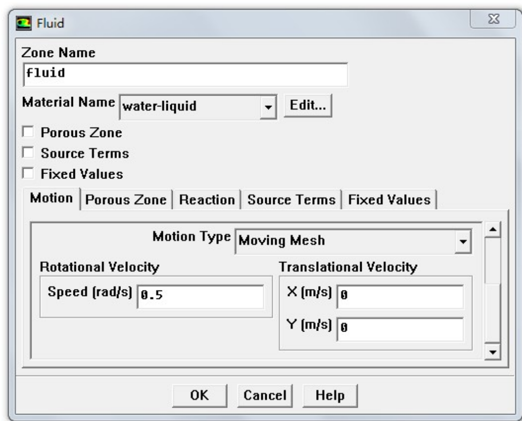


图 9–3　滑移网格的设置

（3）在 Grid Interfaces 对话框中定义网格交界面：执行 Define→Grid Interfaces...命令，弹出如图 9–4 所示的 Grid Interfaces 对话框。在 Grid Interfaces 文本框中输入分界面的名称，在 interface Zone 1 和 interface Zone 2 文本框中各选择一个组成网格分界面的两分界面区域。在 Interface Type 选框中有 Periodic（周期性）和 Coupled（耦合）两个复选框，若为周期性问题，则选择 Periodic；若分界面位于固体和流体区域，则选择 Coupled，最后单击 Create 按

钮，建立新的网格分界面。

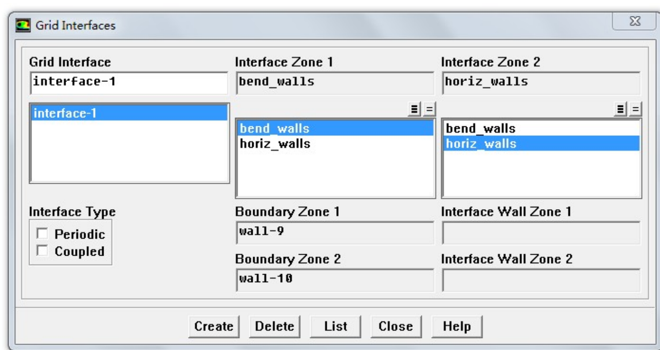


图 9-4　Grid Interfaces 对话框

因为滑移网格技术通常用于非定常问题的计算，所以计算过程中应该注意保存每个时间段的算例文件和数据文件。如果计算的是周期性流动问题，如旋转机械问题，则在计算开始的时候可以采用大的时间步长以缩短开始阶段的不稳定过程，在计算稳定下来后再减小时间步长以保证时间精度，同时每隔一个周期观察一下流场变量的变化。如果变化逐渐缩小，说明计算是稳定的。在变化量小于 5%时，可以认为计算已经收敛。

在采用二阶时间精度进行计算的过程中，开始阶段可以采用大的时间步长，但是在随后减小时间步长的过程中，每次减小不要超过 20%。在计算的最后阶段，最好不要再改变时间步长，因为那样会严重影响计算的时间精度。

在后处理过程中，速度场的显示在默认设置中显示的是绝对速度，也可以根据需要将其改为显示相对速度。

9.3　滑移网格实例分析——十字搅拌器流场模拟

1. 实例概述

在一个二维搅拌器中，十字形搅拌桨的叶轮长 10cm，宽 2cm，搅拌桶半径 50cm，搅拌桨的搅拌速度为 5rad/s，取叶轮中心为坐标系原点，几何模型如图 9-5 所示。

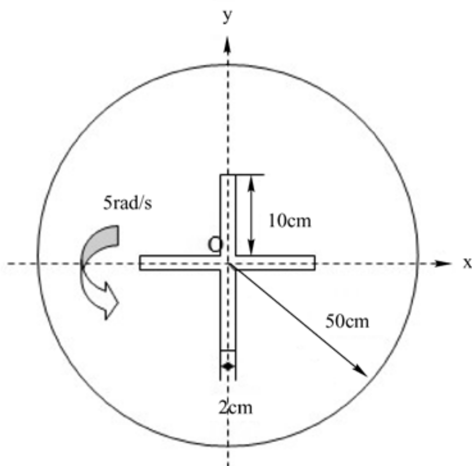


图 9-5　几何模型

2. 模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 建立十字形搅拌桨，单击 Geometry →Face →Create Real Rectangular Face，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 文本框和 Height 文本框中输入数值 0.02 和 0.22，单击 Apply 按钮生成 Y 方向上的矩形，然后将数值改为 0.22 和 0.02 生成 X 方向上的矩形，如图 9-6 所示。



03 单击 Geometry→Face→Unite Faces，在 Unite Faces 面板中选择交叉的两个矩形，单击 Apply 按钮将两个矩形合并，如图 9-7 所示。

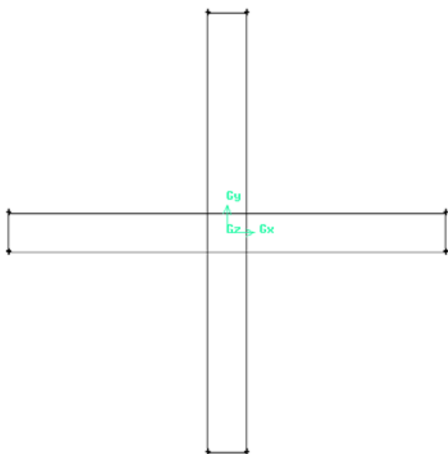


图 9-6　两个交叉的矩形

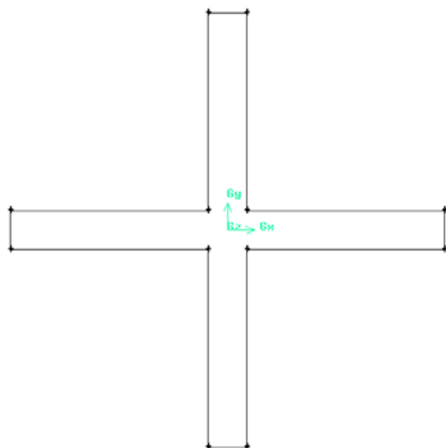


图 9-7　合并后的矩形

04 创建外界的两个圆，单击 Geometry→Face→Create Real Circular Face，在 Create Real Circular Face 面板中输入 Radius:0.5，单击 Apply 按钮，形成外面的大圆，再输入 0.13，生成搅拌桨区域的小圆，如图 9-8 所示。

05 对面域进行布尔操作，单击 Geometry→Face→Subtract Real Faces，在第一行 Face 列表中选取大圆面，第二行 Face 列表中选择小圆面，并选择 Retain 保留小圆面，单击 Apply 按钮，生成圆环面。然后用小圆面减去十字形搅拌桨面。不需要选择 Retain。

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选中圆环面，划分方式为 Quad、Map、Interval Count-200、Proj Interval-50（径向划分方式），单击 Apply 按钮，完成对模型面的网格划分，如图 9-9 所示。

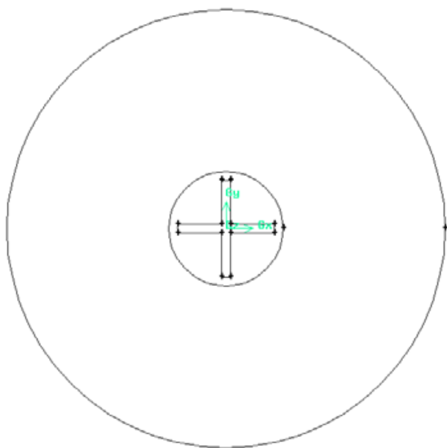


图 9-8　圆形面域

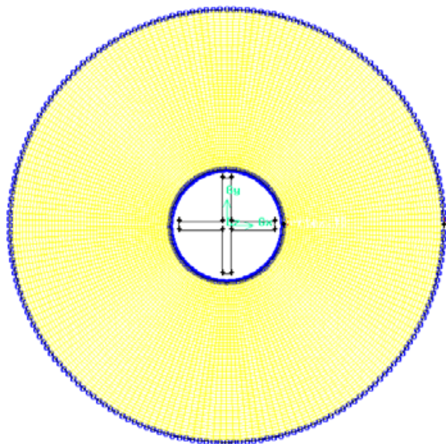


图 9-9　外圆环的网格划分

02 接着对内部区域进行网格划分。在 Mesh Faces 面板中，选中内部区域面，划分方式为 Quad、Pave、Interval size=0.005，单击 Apply 按钮，完成对模型面的网格划分，如图 9-10 所示。

03 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中选择搅拌桨的 12 条边，类型为 WALL，命名为 Impeller-w；选择小圆的两条边界（这两条边是重合在一起的），类型为 INTERFACE，分别命名为 interface-1 和 interface-2。

04 划分静区域和动区域，单击 Zones→Specify Continuum Types，在 Specify Continuum Types 面板中选择外圆环面，类型为 FLUID，命名为 jing；内部面域类型为 FLUID，命名为 dong。

05 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Impeller.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4．求解计算

01 双击 FLUENT 6.3 图标，弹出 FLUENT Version 对话框，选择 2d（二维单精度）计算器，单击 Run 按钮启动 FLUENT 6.3。

02 执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 Impeller.msh。

03 执行 Grid→Check 命令，检查网格文件。

04 执行 Define→Models→Solver...命令，在弹出的 Solver 对话框中选择 Unsteady，其他保持默认值，如图 9-11 所示。

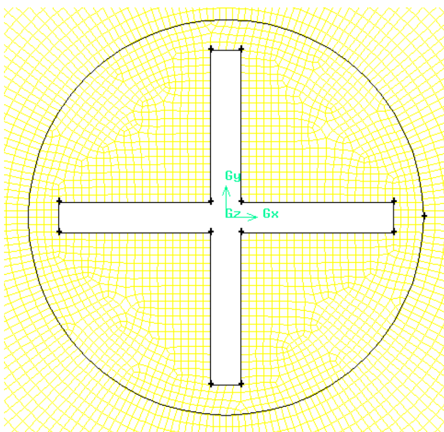


图 9-10　内部面域的网格化分

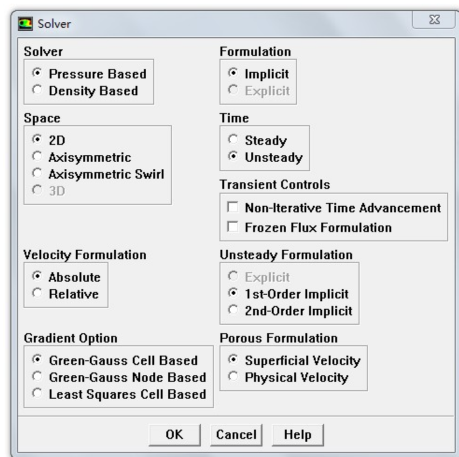


图 9-11　Solver 对话框

05 执行 Define→Models→Viscous...命令，在弹出的 Viscous Model 对话框中选择标准 k-epsilon[2 eqn](k-ε 模型)，其他保持默认值，如图 9-12 所示。

06 执行 Define→Material 命令，从 FLUENT 6.3 自带的材料数据库中调用 water-liquid[h2o<1>]，依次单击 Copy、Change/Create 和 Close 按钮，完成材料的定义。

07 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。

❶ 设置 Fluid 静区域的边界条件。

在 Boundary Conditions 对话框的 Zone 列表框中选择 jing，单击 Set…按钮，弹出 Fluid 对



话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water−liquid，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

❷ 设置 Fluid 动区域的边界条件。

在 Boundary Conditions 对话框的 Zone 列表框中选择 dong，单击 Set…按钮，弹出 Fluid 对话框，在 Material Name 下拉列表框中选择 water−liquid，Motion Type 下拉列表框中选择 Moving Mesh，并在 Rotational Velocity 的 Speed 文本框中输入 5，如图 9−13 所示。单击 OK 按钮完成。

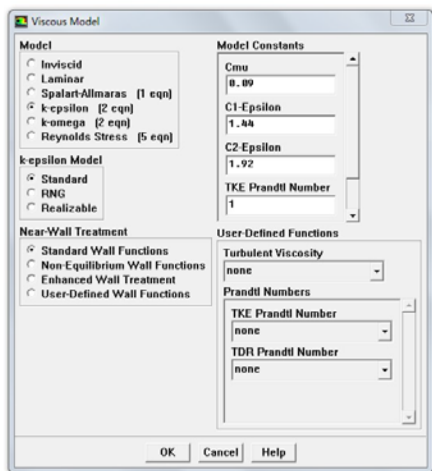


图 9−12　Viscous Model 对话框

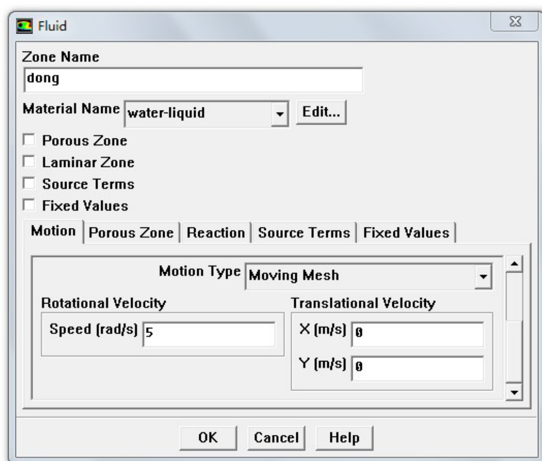


图 9−13　Fluid 对话框

❸ 设置 impeller-w 的边界条件。

在 Boundary Conditions 对话框的 Zone 列表框中选择 impeller-w，单击 Set…按钮，弹出 Wall 对话框，在 Momentum 标签中选择 Wall Motion 中的 Moving Wall 单选按钮，选择 Motion 选项组中的 Relative to Adjacent Cell Zone 和 Rotational，数值保持 0，如图 9−14 所示，设置完毕后单击 OK 按钮。

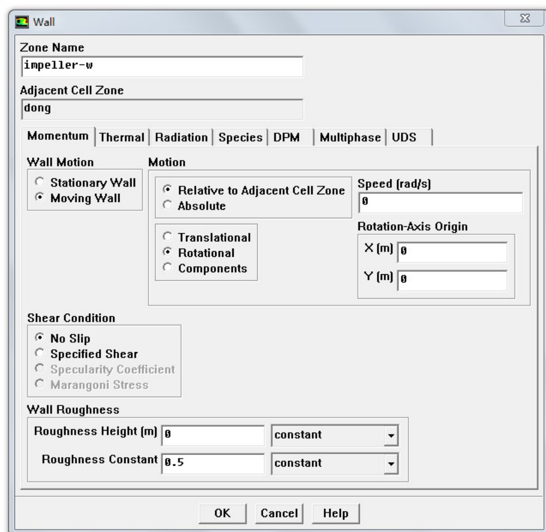


图 9−14　Wall 对话框



❹ 定义交界面。

执行 Define→Grid Interfaces...命令，弹出 Grid Interfaces 对话框，在 Interface Zone 1 文本框中选择 interface−1；Interface Zone 2 文本框中选择 interface−2，Grid Interface 文本框为 interface，如图 9−15 所示。单击 Create 按钮，即完成交界面的创建。

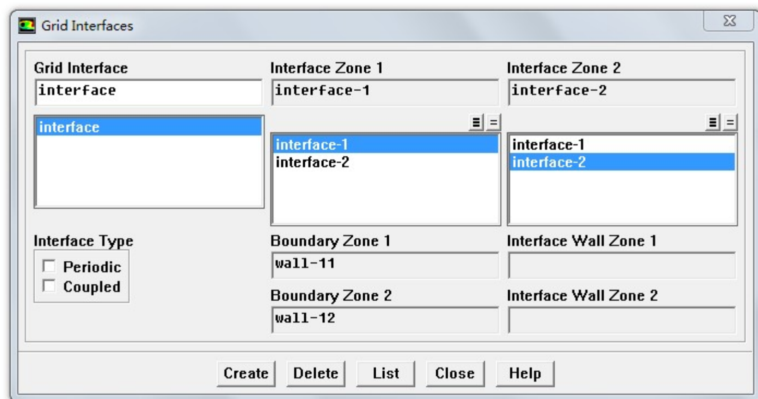


图 9−15 Grid Interfaces 对话框

08 执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出 Solution Controls 对话框，保持默认值。

09 对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在弹出的 Solution Initialization 对话框中选择 all−zones，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮，出现全区域的流量分布图，如图 9−16 所示。

10 执行 Solve→Iterate...命令，在弹出的 Iterate 对话框中设置 Time Step Size 为 0.1，Number of Time Steps 为 500，Max Iterations per Time Step 为 40，其他保持默认值，单击 Iterate 按钮即可开始求解。

11 迭代完成之后，执行 Display→Contours...命令，弹出 Contours 对话框。选择 Contours of 下拉列表框中 Velocity 和 Velocity Magnitude，单击 Apply 按钮，即出现十字形搅拌桨的流速分布图，如图 9−17 所示。

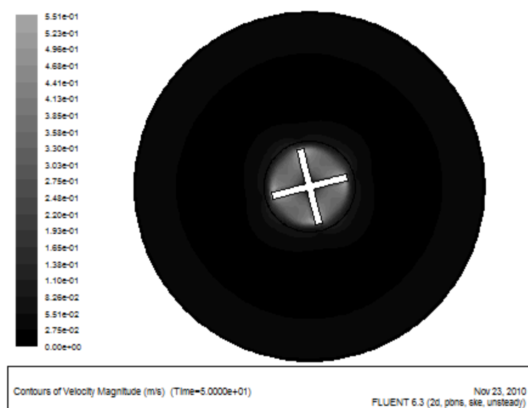


图 9−16 全区域的流量分布图



图 9−17 十字形搅拌桨的流速分布图



12 执行 Display→Vectors…命令，选取 Vectors of 下拉列表框中的 Velocity，即出现搅拌区域的速度矢量图，如图 9-18 所示。

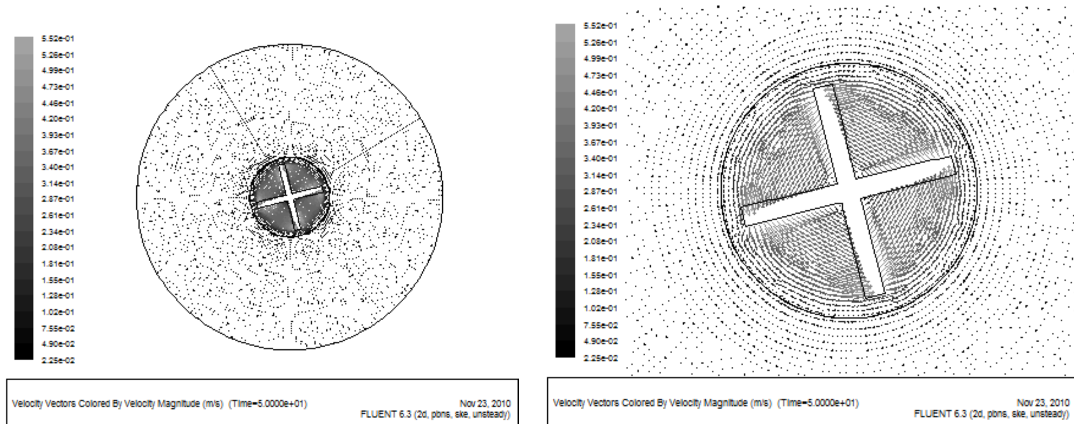


图 9-18　搅拌区域的速度矢量图

13 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 impeller.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 impeller.dat。

14 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

第 10 章　动网格模型模拟

本章主要讲述了动网格模型的概念及使用方法，通过实例展示了动网格模型的设置及求解过程，还阐述了如何采用边界函数定义物体的运动，帮助读者熟悉 FLUENT 软件变形区域流体流动的问题，为使读者能够利用该模型处理生活中的实际工程打下基础。

10.1　动网格模型概述

动网格模型用来模拟流场形状由于边界运动而随时间改变的情况。边界的运动形式可以是预先定义的运动，即可以在计算前指定其速度或角速度，也可以是预先未做定义的运动，即边界的运动要由前一步的计算结果决定。

网格的更新过程由 FLUENT 软件根据每个迭代步中边界的变化情况自动完成。在使用动网格模型时，必须首先定义初始网格、边界运动的方式并指定参与运动的区域，也可以用边界型函数或者 UDF 定义边界的运动方式。FLUENT 软件要求将运动的描述定义在网格面或网格区域上。如果流场中包含运动与不运动两种区域，则需要将它们组合在初始网格中以对它们进行识别。那些由于周围区域运动而发生变形的区域必须被组合到各自的初始网格区域中。不同区域之间的网格不必是正则的，可以在模型设置中用 FLUENT 软件提供的非正则或者滑动界面功能将各区域连接起来。

动网格计算中网格的动态变化过程可以用 3 种模型进行计算，即弹簧光滑模型(Spring-based Smoothing)、动态分层模型（Dynamic Layering）和局部重划模型（Local Remeshing）。

1．弹簧光滑模型

在弹簧光滑模型中，网格的边被理想化为节点间相互连接的弹簧。移动前的网格间距相当于边界移动前由弹簧组成的系统处于平衡状态。在网格边界节点发生位移后，会产生与位移成比例的力，力量的大小根据胡克定律计算。边界节点位移形成的力虽然破坏了弹簧系统原有的平衡，但是在外力作用下，弹簧系统经过调整将达到新的平衡，也就是说由弹簧连接在一起的节点，将在新的位置上重新获得力的平衡。从网格划分的角度来说，从边界节点的位移出发，采用胡克定律，经过迭代计算，最终可以得到使各节点上的合力等于零的、新的网格节点位置。原则上弹簧光滑模型可以用于任何一种网格体系，但是在非四面体网格区域（二维非三角形），需要满足下列条件：

（1）移动为单方向。

（2）移动方向垂直于边界。



2．动态分层模型

对于棱柱型网格区域（六面体或者楔形），可以应用动态层模型。动态层模型是根据紧邻运动边界网格层高度的变化，添加或者减少动态层，即在边界发生运动时，如果紧邻边界的网格层高度增大到一定程度，就将其划分为两个网格层；如果网格层高度降低到一定程度，就将紧邻边界的两个网格层合并为一个层。动网格模型的应用有如下限制：

（1）与运动边界相邻的网格必须为楔形或者六面体（二维四边形）网格。

（2）在动网格交界面以外的区域，网格必须被单面网格区域包围。

（3）如果网格周围区域中有双侧壁面区域，则必须先将壁面和阴影区分割开，再用滑动交界面将二者耦合起来。

（4）如果动网格附近包含周期性区域，则只能用 FLUENT 软件的串行版求解，但是如果周期性区域被设置为周期性非正则交界面，则可以用 FLUENT 软件的并行版求解。

3．局部重划模型

在使用非结构网格的区域上一般采用弹簧光滑模型进行动网格划分，但是如果运动边界的位移远远大于网格尺寸，则采用弹簧光滑模型可能导致网格质量下降，甚至出现体积为负值的网格，或因网格畸变过大导致计算不收敛。为了解决这个问题，FLUENT 软件在计算过程中将畸变率过大，或尺寸变化过于剧烈的网格集中在一起进行局部网格的重新划分。如果重新划分后的网格可以满足畸变率要求和尺寸要求，则用新的网格代替原来的网格；如果新的网格仍然无法满足要求，则放弃重新划分的结果。

在重新划分局部网格之前，首先要将需要重新划分的网格识别出来。FLUENT 软件中识别不合乎要求网格的判据有两个，一个是网格畸变率，一个是网格尺寸，其中网格尺寸又分最大尺寸和最小尺寸。在计算过程中，如果一个网格的尺寸大于最大尺寸，或者小于最小尺寸，或者网格畸变率大于系统畸变率标准，则这个网格就被标志为需要重新划分的网格。在遍历所有动网格之后，再开始重新划分的过程。局部重划模型不仅可以调整体网格，也可以调整动边界上的表面网格。需要注意的是，局部重划模型仅能用于四面体网格和三角形网格。在定义了动边界面以后，如果在动边界面附近同时定义了局部重划模型，则动边界上的表面网格必须满足下列条件：

（1）需要进行局部调整的表面网格是三角形（三维）或直线（二维）。

（2）将被重新划分的面网格单元必须紧邻动网格节点。

（3）表面网格单元必须处于同一个面上并构成一个循环。

（4）被调整单元不能是对称面（线）或正则周期性边界的一部分。

动网格的实现在 FLUENT 软件中是由系统自动完成的。如果在计算中设置了动边界，则 FLUENT 软件会根据动边界附近的网格类型，自动选择动网格计算模型。如果动边界附近采用的是四面体网格（三维）或三角形网格（二维），则 FLUENT 软件会自动选择弹簧光滑模型和局部重划模型对网格进行调整。如果是棱柱型网格，则会自动选择动态分层模型进行网格调整，在静止网格区域则不进行网格调整。

10.2　动网格的设置

动网格设置的步骤如下：

（1）在 Solver 对话框中选择非定常流动（Unsteady）计算。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
第10章 动网格模型模拟
11 P224
12 P248
13 P254

（2）设定边界条件，即设定壁面运动速度。

（3）激活动网格模型，并设定相应参数，操作为 Define→Dynamic Mesh→Parameters...。

（4）指定动网格区域的运动参数，操作为 Define→Dynamic Mesh→Zones...。

（5）保存算例文件和数据文件。

（6）预览动网格设置，操作为 Solve→Mesh Motion...。

（7）在计算活塞问题时，设定活塞计算中的事件，操作为 Define→Dynamic Mesh→Events...。

并可以通过显示阀与活塞的运动，检查上述设置是否正确，操作为 Display→IC Zone Motion...。

（8）应用自动保存功能保存计算结果，操作为 File→Write→Autosave...。

在动网格计算中，因为每个计算步中网格信息都会改变，而网格信息是储存在算例文件中的，所以必须同时保存算例文件和数据文件。

（9）如果想建立网格运动的动画过程，则可以在 Solution Animation 对话框中进行相关设置。

10.2.1　动网格参数的设置

使用动网格模型，需要在 Dynamic Mesh Parameters 对话框中激活 Dynamic Mesh 选项。如果计算的是活塞运动，则同时激活 In-Cylinder 选项。然后选择动网格模型，并设置相关参数。如果激活了活塞运动，则需要同时设置活塞运动的相关参数，如图 10-1 所示。

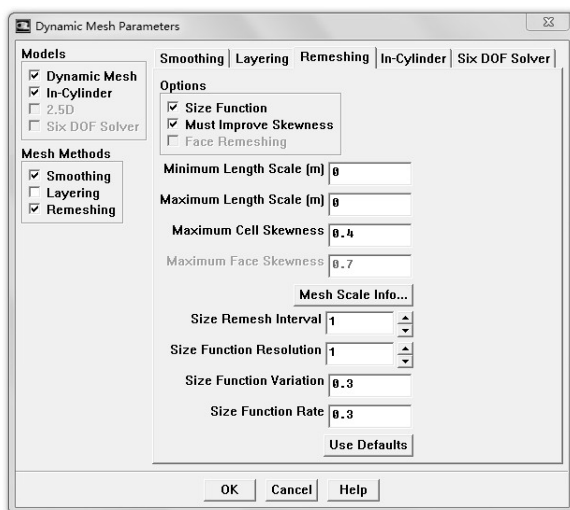


图 10-1　Dynamic Mesh Parameters 对话框

1．选择网格更新模型

在 Mesh Methods 选框中选择 Smoothing（弹簧光滑模型）、Layering（动态分层模型）或 Remeshing（局部重划模型）。

2．设置弹簧光滑参数

激活弹簧光滑模型，相关参数设置位于 Smoothing 标签下，可以设置的参数包括 Spring Constant Factor（弹簧弹性系数）、Boundary Node Relaxation（边界点松弛因子）、Convergence Tolerance（收敛判据）和 Number of Iterations（迭代次数）。



3．动态分层

在 Layering 标签下，可以设置与动态分层模型相关的参数。通过设定 Constant Height 与 Constant Ratio 可以确定分解网格的两种方法。

4．局部重新划分网格

在 Remeshing 标签下，设置与局部重划模型相关的参数。可以设置的参数包括 Maximum Cell Skewness（最大畸变率）、Maximum Cell Volume（最大网格体积）和 Minimum Cell Volume（最小网格体积），主要用于确定哪些网格需要被重新划分。在默认设置中，如果重新划分的网格优于原网格，则用新网格代替旧网格；否则，将保持原网格划分不变。如果无论如何都要采用新网格，则可以在 Options 选框中选择 Must Improve Skewness 复选框。

5．设定活塞运动参数

如果在计算中选择使用 In-Cylinder 模型，则需要指定 Crank Shaft Speed（曲柄速度）、Starting Crank Speed（曲柄起始速度）、Crank Period（曲柄周期）以及 Crank Angle Step Size（曲柄角度时间步长）。

10.2.2　动网格运动方式的定义

在计算动网格问题时，必须定义动网格区的运动方式。执行 Define→Dynamic Mesh→Zones...命令，在 Dynamic Zones 对话框中可以修改动态区域的设置、计算刚体运动区域的重心或删除一个动态区域。方法是先在 Dynamic Zones 列表框中选择一个动网格区，然后修改其设置参数，或计算其重心，或进行删除操作，最后单击 Create 按钮保存设置。对于新加入的区域，需要先从 Zone Names 列表框中选择相关区域，然后在 Type 列表框中选择其运动类型，可选择的运动类型包括 Stationary（静止）、Rigid Body（刚体运动）、Deforming（变形）和 User-Defined（用户自定义）4 种。

1．静止区域设置

如果被指定区域为静止区域，则首先在 Zone Names 列表框中选择这个区域，然在 Type 列表框中选择 Stationary，再指定 Adjacent Zone（相邻区域）的 Cell Height（网格高度）用于网格重新划分，最后单击 Create 按钮完成设置。

2．刚体运动区域设置

如果被指定区域为刚体运动区域，则其设置过程如下：

（1）在 Zone Names 列表框中选择这个区域的名称，然后在 Type 列表框中选择 Rigid Body。

（2）在 Motion Attributes（运动属性）标签的 Motion UDF/Profile（用 UDF 或型函数定义运动）中确定究竟用型函数，还是 UDF 来做运动定义。

（3）在 C.G. Location（重心位置）中定义刚体重心的初始位置。

（4）在 C.G. Orentation（重心方向）中定义重力在惯性系中的方向。

（5）如果计算中包含活塞计算，则需要在 Valve/Piston Axis（阀门或活塞轴）中指定阀门或活塞的参考轴。如果在所定义的网格区域中，某种形状的网格单元需要被排除在上述设置之外，则可以在 Motion Mask（运动屏蔽）中选择这些单元形状。

（6）如果所定义的区域是面区域，则还需要定义 Cell Height。这个参数用于定义局部网

格重划时，与面区域相邻的网格的理想高度。

（7）单击 Create 按钮，完成设置。

3．变形运动

变形区域的设置过程如下：

（1）在 Zone Names 列表框中选择区域，并在 Type 列表框中选择 Deforming。

（2）在 Geometry Definition 中定义变形区的几何特征：如果没有合适的几何形状，就在 Definition 中选择 none；如果变形区为平面，则选择 plane 并在 Point on Plane 中定义平面上一点，同时在 Plane Normal 中定义法线方向；如果变形区为圆柱面，则选择 Cylinder，并同时定义 Cylinder Radius、Cylinder Origin 和 Cylinder Axis；如果变形区几何形状需要用 UDF 来定义，则在 Definition 中选择 user-defined，并在 Geometry UDF 中选择适当的函数。

（3）在 Remeshing Options 标签下定义与网格局部重划相关的参数。重划方法在 Mesh Methods 中选择，包括 Smoothing、Layering 和 Remeshing。如果动网格区域为面域，则需要设置局部重划模型中的几个参数，包括 Height、Height Factor 和 Maximum Skewness。如果动网格区域为体积域时，还可以设置 Minimum Volume、Maximum Volume 和 Maximum Skewnes。

（4）单击 Create 按钮完成设置。

4．用户定义的运动方式

对于同时存在运动和变形的区域，只能使用 UDF 来定义其运动方式，定义步骤如下：

（1）在 Zone Names 列表框中选择需要定义的区域名称，并在 Type 列表框中选择 User-Defined（用户定义）。

（2）在 Motion Attributes 标签的 Mesh Motion UDF（网格运动 UDF）中选择相应的 UDF 函数。

（3）单击 Create 按钮完成设置。

10.2.3 动网格预览

在设置好动网格模型及动网格区的运动方式后，可以通过预览的方式检查设置效果。预览功能执行 Solve→Mesh Motion...命令，弹出 Mesh Motion（网格运动）对话框，如图 10-2 所示。

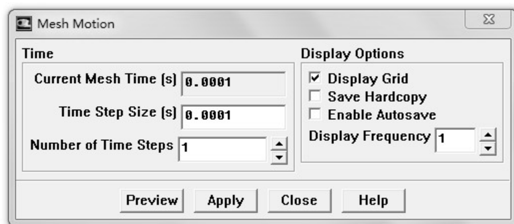


图 10-2 Mesh Motion 对话框

预览操作步骤如下：

（1）在参数设置完毕后，首先保存算例（case）文件。

（2）设置迭代时间步数和时间步长。在计算过程中，当前时间将被显示在 Current Mesh Time



（当前网格时间）文本框中。

（3）为了在图形窗口中预览网格变化过程，需要激活 Display Options（显示选项）选项组中的 Display Grid（显示网格），并在 Display Frequency（显示频率）微调框中设置显示频率，即每分钟显示图幅数量。如果要保存显示的图形，则同时激活 Save Hardcopy（保存硬复制）选项。

（4）单击 Preview（预览）按钮，开始预览。

具体步骤：在 Display Grid（显示网格）对话框中选择准备预览的网格区域；在 IC Zone Motion（网格运动）对话框中，设置曲柄角度增量（Increment）和迭代步数（Number of Steps）；单击 Preview（预览）按钮，开始预览。

10.3　动网格实例分析

下面通过两个实例简要介绍动网格模型的具体应用方法。

10.3.1　二维实体入水模拟

1．实例概述

一个半径 20cm 的小球在离水面 3m 的地方落下，在 0.01s 内速度达到 200m/s，之后匀速运动，已知深 5m、宽 10m 几何模型如图 10-3 所示。

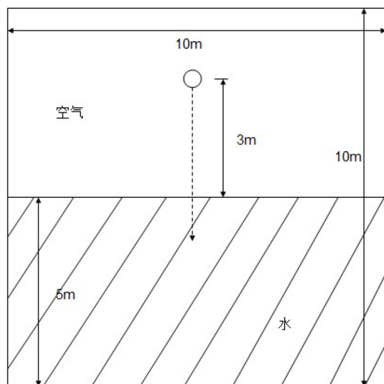


图 10-3　几何模型

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 建立小球几何剖面，单击 Geometry→Face→Create Real Circular Face，在 Create Real Circular Face 面板的 Radius 文本框中输入数值 0.2，单击 Apply 按钮生成圆面。

03 建立矩形面域。单击 Geometry→Face→Create Real Rectangular Face，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 文本框和 Height 文本框中输入数值 10，单击 Apply 按钮生成矩形面。

04 建立包裹小球的外围区域。单击 Geometry→Face→Move/Copy Faces，在 Move/Copy Faces 面板中选择小圆面，选择 Copy 和 Scale，在 Factor 文本框中填写 1.5，如

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
第 10 章 动网格模型模拟
11 P224
12 P248
13 P254

图 10−4 所示。单击 Apply 按钮，即复制生成小圆外围区域，如图 10−5 所示。

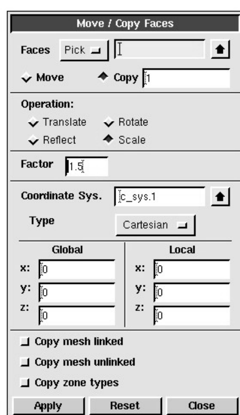


图 10−4 Move/Copy Faces 面板

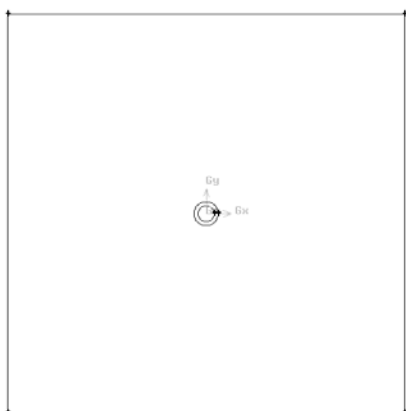


图 10−5 建立的矩形面

05 由于小圆的位置不对，所以还需要对其位置进行调整。单击 Geometry→Face→Move/Copy Faces，在 Move/Copy Faces 面板中选择小圆面和外围圆面，选择 Move 和 Translate，沿 Y 轴方向向上移动 3，单击 Apply 按钮，即得到移动后的图形，如图 10−6 所示。

06 对面域进行布尔操作。单击 Geometry→Face→Subtract Faces，在第一行 Face 文本框中选取矩形面，第二行 Face 文本框中选择外围圆面，并选择 Retain 保留外围圆面，单击 Apply 按钮。然后用外围圆面减去小圆面。不需要选择 Retain。

07 外围圆面的边界可使用 Edge 面板中的 Connect Edges按钮重合为一条。

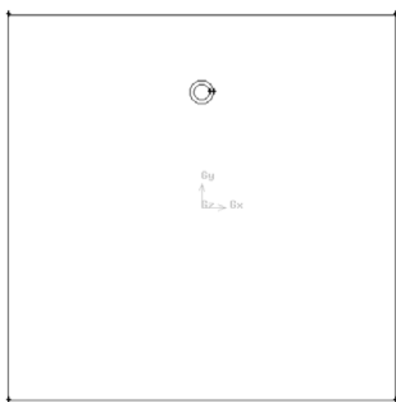


图 10−6 移动后的几何模型

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选中圆环面，划分方式为 Quad、Map、Interval size–0.05，单击 Apply 按钮，完成对圆环的网格划分，如图 10−7 所示。

02 对外部区域进行网格划分。在 Mesh Edge 面板中，选中大矩形的 4 条边，划分方式为 Interval size–0.1，单击 Apply 按钮，完成对矩形面边的网格划分。



03 回到 Mesh Faces 面板，选择外部整体区域，划分方式为 Tri、Pave，其他保持默认值，单击 Apply 按钮，完成对外部区域的网格化分，如图 10-8 所示。

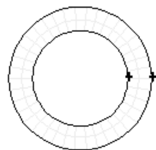


图 10-7　圆环的网格划分

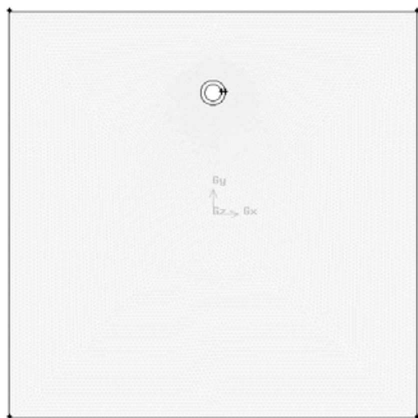


图 10-8　几何面域的网格化分

04 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中选择小圆边界，类型为 WALL，命名为 dong-w；选择矩形面的左右和下边界，类型为 WALL，命名为 Rec-w；矩形的上边界，类型为 PRESSURE_OUTLET，命名为 Rec-out。

05 划分静区域和动区域，单击 Zones→Specify Continuum Types，在 Specify Continuum Types 面板中选择内部圆环面，类型为 FLUID，命名为 dong；外部区域面类型为 FLUID，命名为 jing。

06 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 jump.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4．求解计算

01 双击 FLUENT 6.3 图标，弹出 FLUENT Version 对话框，选择 2d（二维单精度）计算器，单击 Run 按钮启动 FLUENT6.3。

02 执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 jump.msh。

03 执行 Grid→Check 命令，检查网格文件。

04 执行 Define→Models→Solver...命令，在弹出 Solver 对话框中选择 Unsteady，其他保持默认值。

05 执行 Define→Models→Multiphase...命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中选择标准 VOF 模型，其他保持默认值。

06 执行 Define→Material 命令，从 FLUENT6.3 自带的材料数据库中调用 water-liquid[h2o<1>]，如图 10-9 所示。顺序单击 Copy，Change/Create 和 Close 按钮，完成材料的定义。

07 执行 Define→Phases…命令，在 Phase 列表框中选择 phase-1，定义为 air；选择 phase-2，定义为 water。

08 执行 Define→Operating Conditions 命令，在 Operating Conditions 对话框中，选中 Gravity，指定重力方向为 y 轴，大小为–9.81，同时选中 Specified Operating Density 选项，保

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
第 10 章 动网格模型模拟
11 P224
12 P248
13 P254

持默认值，单击 OK 按钮。

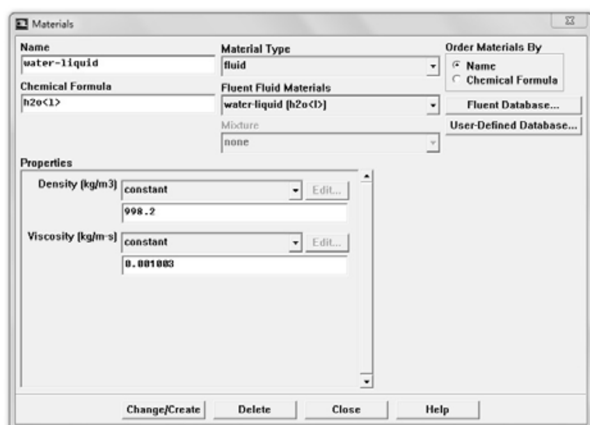


图 10-9　Materials 面板

09 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。设置 Rec-out，Mixture 相设定 Gauge Pressure 为 0，water 相设定 Backflow Volume Fraction 为 0。

10 执行 Define→Dynamic Mesh→Parameters 命令，在弹出的 Dynamic Mesh Parameters 对话框中勾选 Dynamic Mesh 复选框，如图 10-10 所示。在展开的对话框中根据图 10-11 所示的参数输入，单击 OK 按钮。

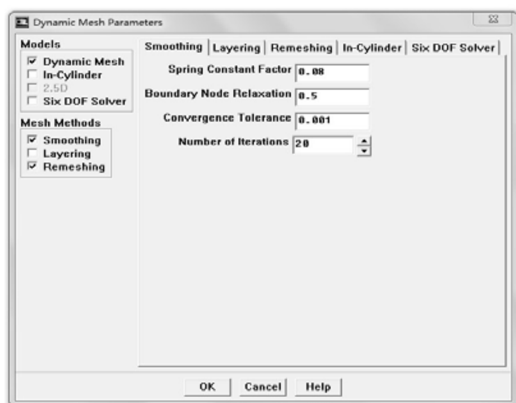


图 10-10　Dynamic Mesh Parameters 对话框

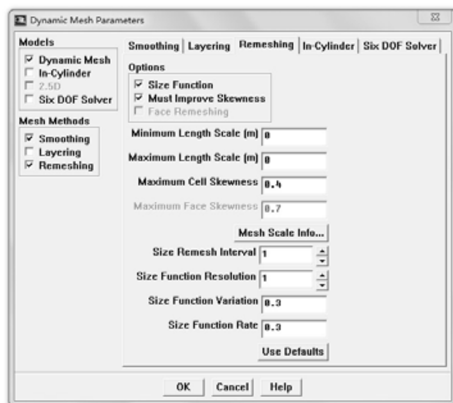


图 10-11　参数设定

11 将下列信息用 txt 的格式输出保存，用于本题中的边界函数。

```
((dong 3 point)
(time 0 0.01 0.05)
(v_x 0 0 0)
(v_y 0 -200 -200))
```

12 执行 Defline→Profiles 命令，弹出 Boundary Profiles 对话框，如图 10-12 所示。单击 Read…按钮，导入上步的 txt 文件，单击 Close 按钮。



13 执行 Defline→Dynamic Mesh→Zone 命令，弹出如图 10-13 所示的 Dynamic Mesh Zones 对话框，在 Zone Names 下拉列表框中选择 dong-w，设置 Type 选框为 Rigid Body，选择 Meshing Options 标签，将其中的 Cell Height 文本框设置为 0.05，单击 Create 按钮。然后选择 Zone Names 下拉列表框中的 dong，进行与 dong-w 相同的设置，单击 Close 按钮。

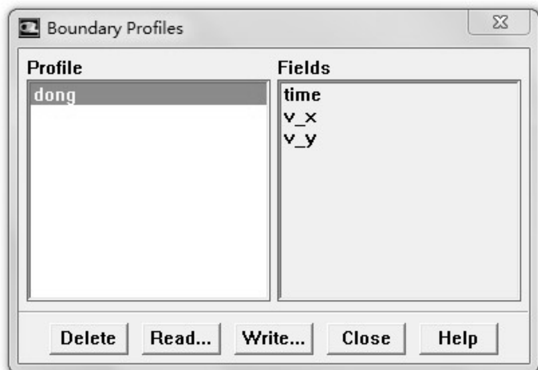


图 10-12　Boundary Profiles 对话框

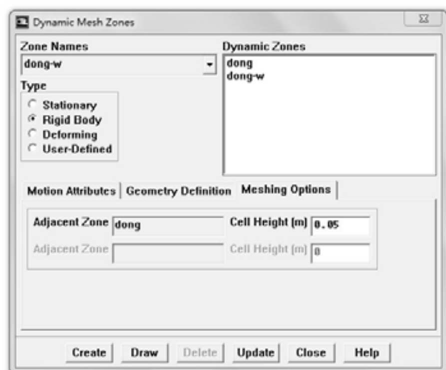


图 10-13　Dynamic Mesh Zones 对话框

14 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出 Solution Controls 对话框，保持默认值。

15 对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

16 对初始区域进行定义。执行 Adapt→Region…命令，弹出 Region Adaption 对话框，如图 10-14 所示。设置 X Min 为–5，X Max 为 5，Y Min 为–5，Y Max 为 0，然后单击 Mark 按钮，即完成水底区域的设置。

17 执行 Solve→Initialize→Patch…命令，选择 Phase 下拉列表框为 water，选择 Registers to Patch 列表框中的 hexahedron –r0，选中 Volume Fraction，在 Value 文本框中输入 1，如图 10-15 所示。单击 Patch 按钮完成对水底部分区域的初始化定义。

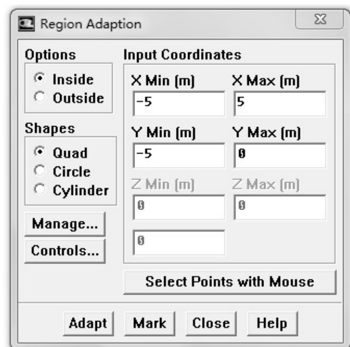


图 10-14　Region Adaption 对话框

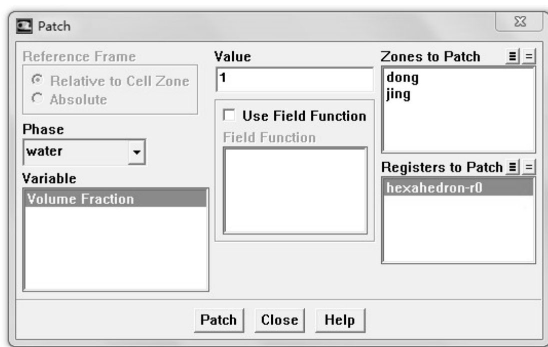


图 10-15　Patch 对话框

18 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选择 Plot，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

19 执行 Solve→Animate→Define 命令，弹出 Solution Animation 对话框，按照图 10-16 所示设置参数。

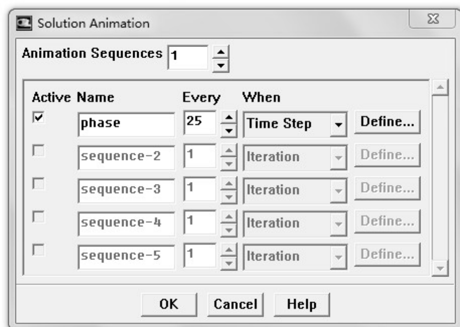


图 10-16　Solution Animation 对话框

20 单击图 10-16 中的 Define…按钮，弹出 Animation Sequence 对话框，选择 Metafile，并在 Window 微调框中输入 1，在 Display Type 选项组中选择 Contours，如图 10-17 所示。出现 Contours 对话框，选择 Contours of 下拉列表框中的 Phases 及 Volume fraction，勾选 Filled，单击 Display 按钮，即出现初始时刻的空气体积分数云图，如图 10-18 所示。

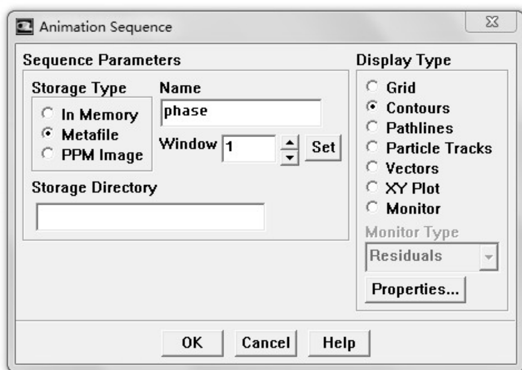


图 10-17　Animation Sequence 对话框

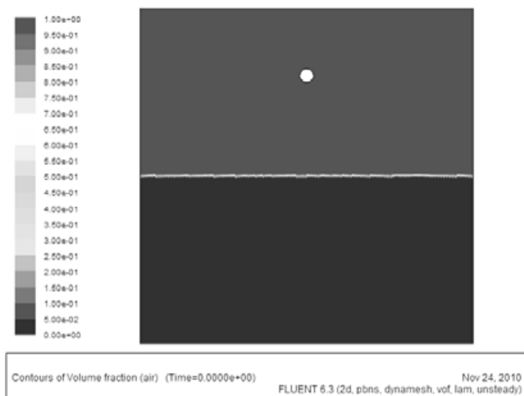


图 10-18　初始时刻的空气体积分数云图

21 执行 Solve→Iterate…命令，在弹出的 Iterate 对话框中设置 Time Step Size 为 0.0001，Number of Time Steps 为 400，其他保持默认值，单击 Iterate 按钮即可开始求解。

22 执行 Display→Contours…命令，弹出 Contours 对话框，单击 Dispaly 按钮，即出现空气体积分数云图，如图 10-19 所示。

23 迭代完成后，执行 Solve→Animate→Playback 命令，打开 Playback 对话框，勾选 Play Once。选中 Phase，保持 Start Frame 为 1，Increment 为 1，End Frame 为 16。拖动 Repaly Speed 滚动条来控制播放速度。最后在 Write/Record Format 中选择 Hardcopy Frames，单击 Write 按钮。播放的同时，动画以.jpg 的格式保存每帧图片在工作目录下。

24 将生成的每帧图片保存在新建的文件夹下，以文件夹的形式导入 Adobe ImageReady 中进行动画处理，生成动画文件 jump.gif，并保存在当前目录下。



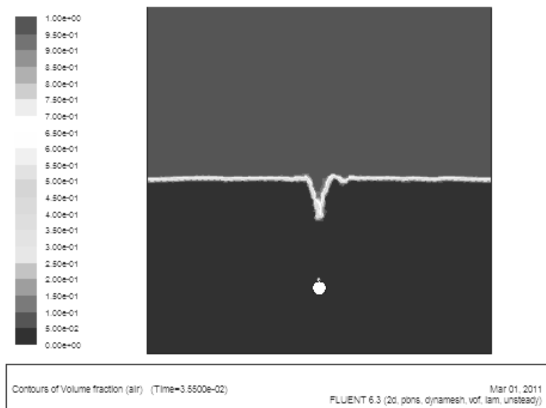


图 10-19　空气体积分数云图

25 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 jump.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 jump.dat。

26 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT6.3。

▷▷▷ 10.3.2　三维活塞在气缸中的运动模拟

1．实例概述

已知一个冲程 25mm，直径 25mm 的气缸，活塞从其顶部向下运动。活塞在气缸内的运动如图 10-20 所示。现在用 FLUENT6.3 动网格来模拟活塞在气缸中的运动。

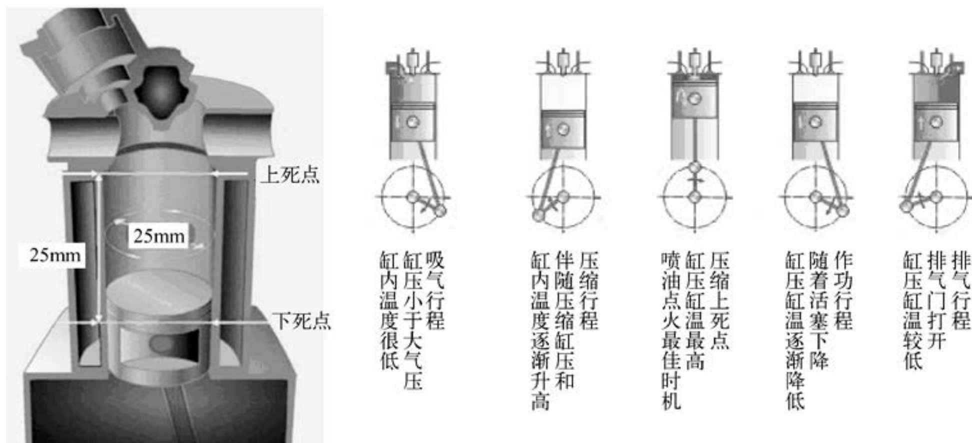


图 10-20　活塞在气缸内活动示意图

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 Geometry→Volume→Create Real Cylinder，弹出 Create Real Cylinder 对话框，在 Height 文本框和 Radius 文本框中分别输入 34.5 和 12.5，单击 Apply 按钮，生成气缸模拟体。然后输入 8 和 12.5，生成活塞模拟体。接着输入 1.5 和 12.5，单击 Apply 按

钮，在活塞与气缸交界处再设置一薄面，在网格划分时可以平和过渡。

03 单击 Geometry→Volume→Move/Copy Volume，选中 Volume.3，输入（0，0，8），单击 Apply 按钮，几何体简图如图 10−21 所示。

04 单击 Geometry→Volume→Subtract Real Volume，在弹出的 Subtract Real Volume 面板中先选择 Volume.1，再在下一行中选择 Volume.2 和 Volume.3，并选择 Retain，单击 Apply 按钮，即将大圆柱分成 3 个小圆柱体，除去不需要计算的区域。

05 单击 Geometry→Face→Connect Faces，弹出如图 10−22 所示的 Connect Faces 面板，选择 Volume.2 和 Volume.3 重合的两个面，单击 Apply 按钮，合成一个面。然后选择 Volume.3 和 Volume.1 重合的两个面，单击 Apply 按钮，合成一个面。

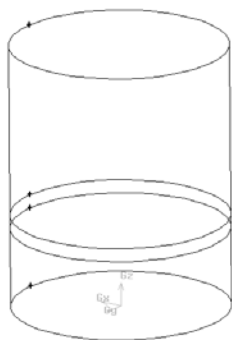


图 10−21　几何体简图

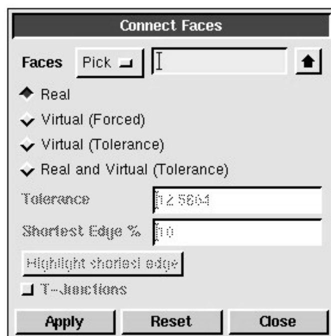


图 10−22　Connect Faces 面板

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Volume→Mesh Volume，选中 Volume.1，采用 Tet/Hybrid 和 Tgrid 的划分方式，Interval Count 的分段方式，分成 50 段，单击 Apply 按钮，得到 Volume.1 的体网格，如图 10−23 所示。

02 选中 Volume.2，采用 Hex，Cooper 的划分方式，分成 50 段，如图 10−24 所示。

03 选择 Volume.3，采用 Tex/Hybrid 和 Hex Core 的划分方式，分成 50 段，如图 10−25 所示。

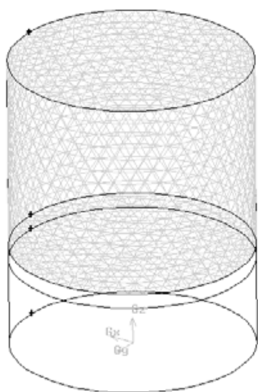


图 10−23　Volume.1 的体网格划分

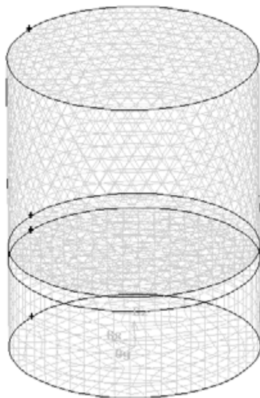


图 10−24　Volume.2 的体网格划分

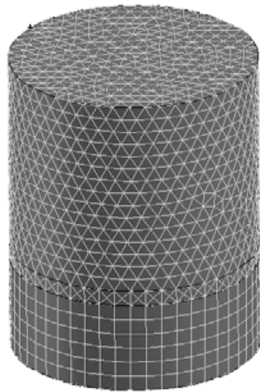


图 10−25　气缸网格模型



04 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中选择活塞上顶面，命名为 moving-wall，类型为 WALL；选择活塞下底面，命名为 bottom；选择活塞壁面，命名为 side-wall-1；选择夹层壁面，命名为 side-wall-2；选择气缸壁面，命名为 side-wall-3；选择气缸顶面，命名为 top，类型都为 WALL。

05 单击 Zones→Specify Continuum Types，出现 Specify Continuum Types 对话框，在 Entity 中选中 Volume.1，Type 为 FLUID，命名为 fluid-1；选择 Volume.3，命名为 fluid-2；选择 Volume.2，命名为 fluid-3，单击 Apply 按钮，完成对流体的定义。

06 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 valve.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 3d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 valve.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Grid→Scale 命令，调节网格尺寸。

04 执行 Define→Models→Solver…命令，在 Solver 对话框中的 Time 项选择 Unsteady，如图 10-26 所示。

05 执行 Define→Models→Energy…命令，勾选 Energy Equation 复选框，如图 10-27 所示。

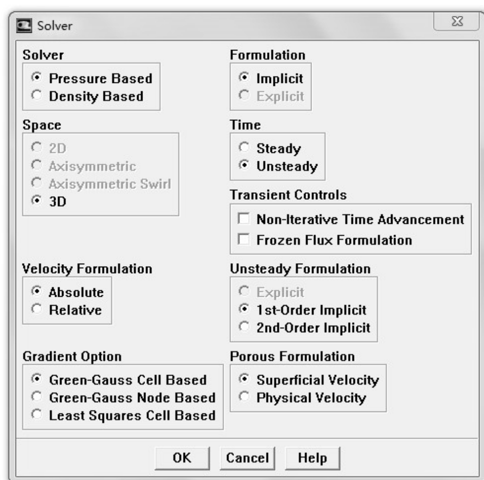


图 10-26　Solver 对话框

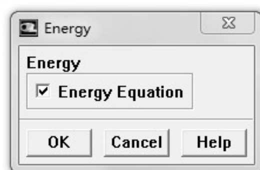


图 10-27　Energy 对话框

06 执行 Define→Materials 命令，弹出如图 10-28 所示的 Materials 对话框，Density 下拉列表框选择 ideal-gas，其他项保留默认值，单击 Change/Create 按钮。

07 执行 Define→Dynamic Mesh→Parameters 命令，在弹出的 Dynamic Mesh Parameters 对话框中勾选 Dynamic Mesh 和 In-Cylinder 复选框，在 Mesh Methods 选框中选中 Smoothing、Layering、Remeshing 复选框。选择 Smoothing 复选框，其中各项参数的设置如

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
第 10 章 动网格模型模拟
11 P224
12 P248
13 P254

图 10-29 所示。

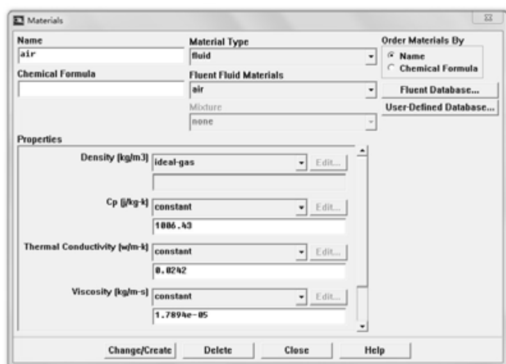


图 10-28　Materials 对话框

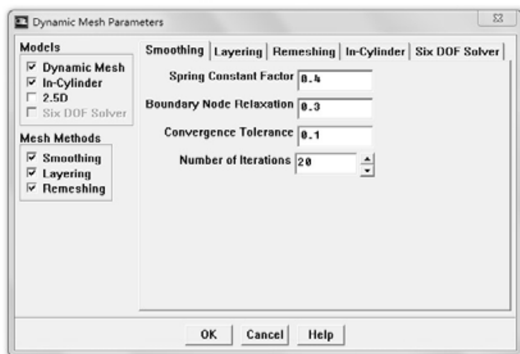


图 10-29　动网格参数设置/Smoothing

08 单击 Remeshing 标签，打开 Remeshing Parameters 的设置对话框，如图 10-30 所示。

09 单击 In-Cylinder 标签，打开 In-Cylinder Parameters 设置对话框，如图 10-31 所示。Starting Crank Angle 文本框与 Crank Period 文本框分别设为 180 和 720，表示当活塞处在下死点位置时，活塞杆的曲柄为 180°，到上死点时曲柄角为 360°，再次回到下死点时曲柄角为 540°，再到上死点为一周期 720°。设置活塞杆冲程（Piston Stroke）文本框为 8，设置连杆长度（Connecting Rod Length）文本框为 14。

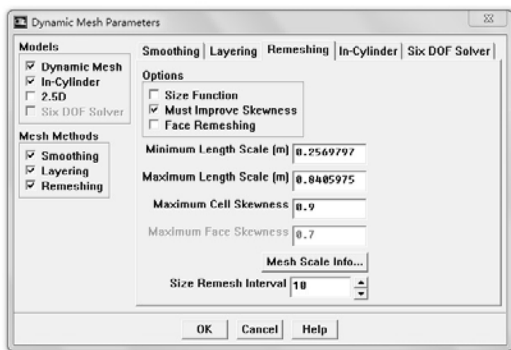


图 10-30　动网格参数设置/Remeshing

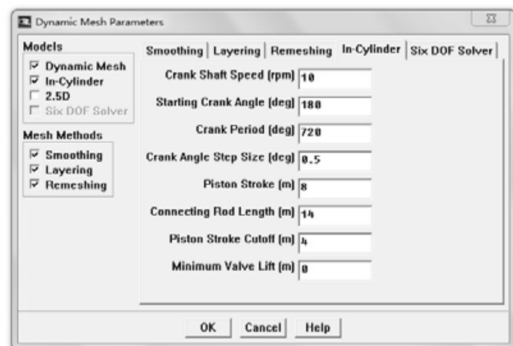


图 10-31　动网格参数设置/In-Cylinder

10 执行 Defline→Dynamic Mesh→Zone 命令，弹出 Dynamic Mesh Zones 对话框。

❶ 设置活塞（moving-wall）的运动。在 Zone Name 下拉列表框中选择 moving-wall；在 Type 选框中选择 Rigid Body；在 Motion UDF/Profile 下拉列表框中选择**piston-full**；单击 Meshing Options 标签，弹出如图 10-32 所示的对话框，在 Meshing Options 中设置 Cell Height 为 0.5；单击 Create 按钮。

❷ 设置活动壁面（side-wall-1）的运动。在 Zone Name 下拉列表框中，选择 side-wall-1；在 Type 列表框中选择 Deforming；单击 Geometry Definition，在弹出的对话框的 Definition 下拉列表框中选择 cylinder；Cylinder Radius 选择 4；Cylinder Origin 的坐



标为（0，0，0），Cylinder Axis 的坐标为（1，0，0），如图 10-33 所示。单击 Create 按钮完成。

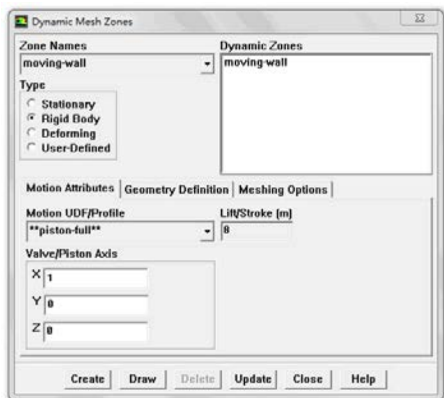


图 10-32　Dynamic Mesh Zones 对话框

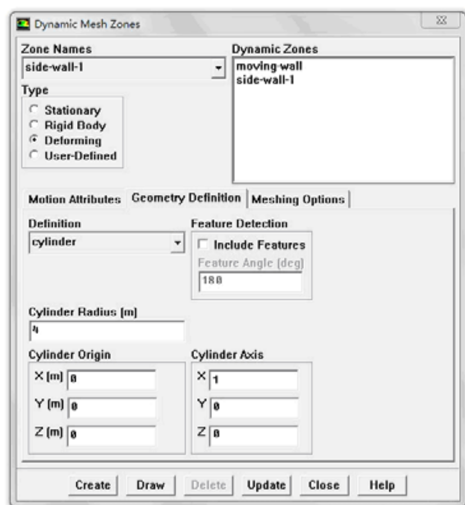


图 10-33　动网格区域设置对话框——活动壁面设置

❸ 设置活塞上部区域的运动。如图 10-34 所示，在 Zone Names 下拉列表框中，选中 fluid-3，如图 10-34 所示。Type 选框中选择 Rigid Body；在 Motion UDF/Profile 下拉列表框中选择**piston-full**；单击 Create 按钮。同理，设置 fluid-2。

11 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出如图 10-35 所示的 Solution Controls 对话框，保持默认值。在压力—速度耦合（Pressure-Velocity Coupling）下拉列表框中选择 PISO；亚松弛因子（Under-Relaxation Factors）选项组中 Pressure 文本框设为 0.6，Momentum 文本框为 0.9；在 Discretization 选项组的 Pressure 下拉列表框中选择 PRESTO!；单击 OK 按钮。

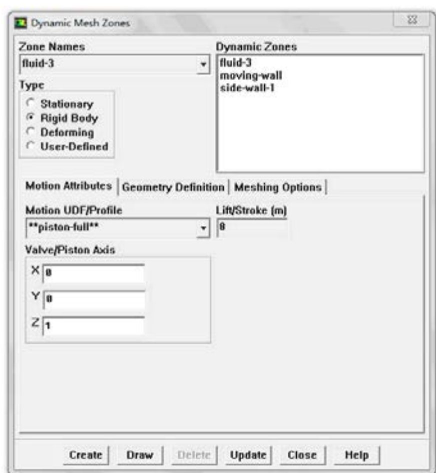


图 10-34　动网格区域设置对话框——活塞上部区域的设置

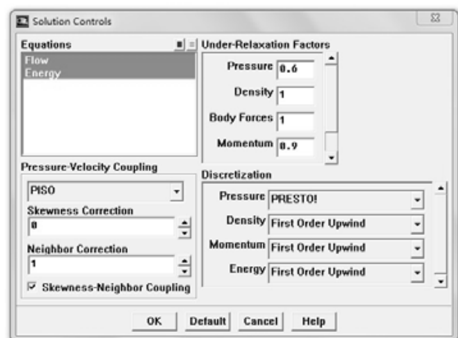


图 10-35　Solution Controls 对话框

12 对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

13 执行Solve→Monitors→Residual…命令，在弹出的Residual Monitors对话框中选择Plot，其他保持默认值，单击OK按钮。

14 执行 File→Write→Autosave，弹出如图 10-36 所示的对话框，Autosave Case File Frequency 微调框与 Autosave Data File Frequence 微调框都输入 90，即每迭代 90 步保存一次 case 与 data 文件；Filename 文本框中输入文件名与保存文件的路径。

15 执行 Solve→Animate→Define 命令，弹出 Solution Animation 对话框，按照图 10-37 设置参数。Animation Sequences 微调框输入 1，Active Name 文本框输入 temperature，Every 微调框输入 5，When 下拉列表框输入 Time Step，即每隔 5 个时间步长保存一次温度等高线图。

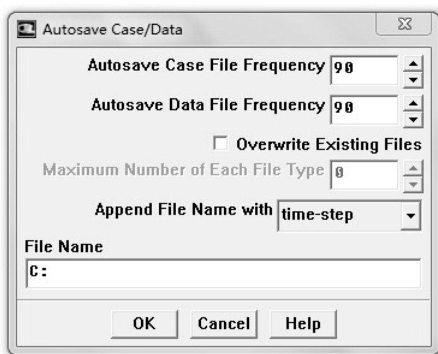


图 10-36 Autosave Case/Data 对话框

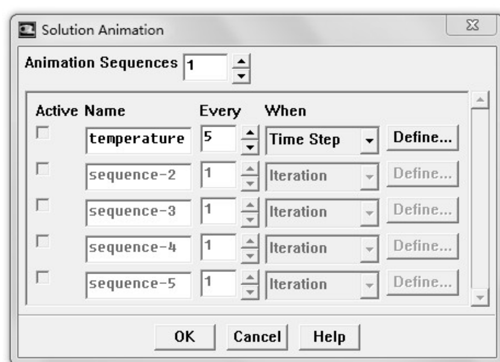


图 10-37 设置参数创建温度云图动画

16 单击 Define…按钮，弹出如图 10-38 所示的对话框。Window 微调框设为 2，Display Type 选项组中选择 Contours，弹出如图 10-39 所示的 Contours 对话框。在 Contours of 下拉列表框中选择 Temperature 和 Static Temperature，去掉 Auto Range，在 Min 文本框中与 Max 文本框中分别输入 300 与 600，Surfaces 列表框同时选中 moving-wall、side-wall-1、side-wall-2、side-wall-3、top-wall，单击 Display 按钮，弹出如图 10-40 所示的 t=0s 时的静温云图。

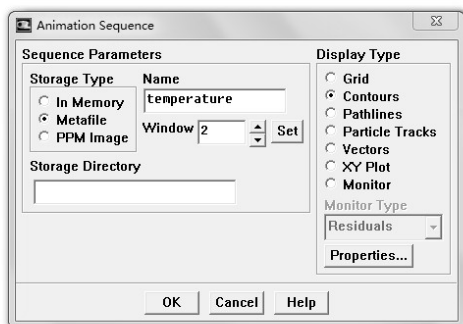


图 10-38 动画定义对话框

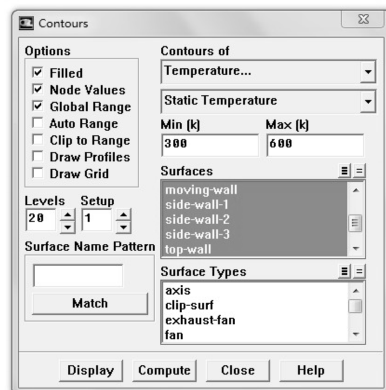


图 10-39 设置温度云图对话框



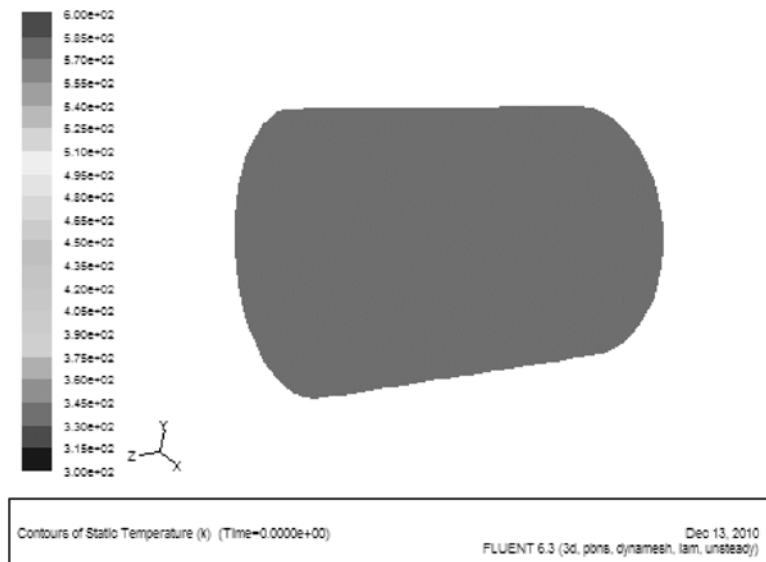


图 10-40　t=0s 时静温云图

17 执行 Solve→Iterate…命令，在弹出的 Iterate 对话框中设置 Number of Time Steps 为 720，其他保持默认值，单击 Iterate 按钮即可开始求解。

18 执行 Display→Contours…命令，弹出 Contours 对话框，在 Contours of 下拉列表框中选择 Temperature 和 Static Temperature，Surfaces 列表框中选择 moving-wall、side-wall-1、side-wall-2、side-wall-3、top-wall，单击 Display 按钮，出现气缸静温分布图，如图 10-41 和图 10-42 所示。

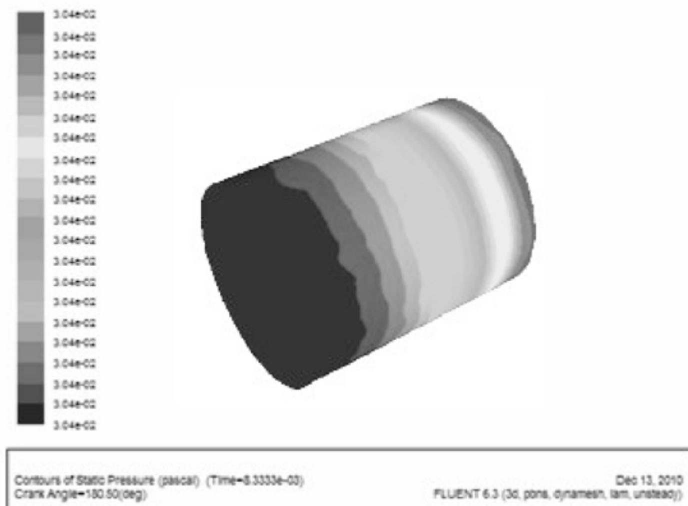


图 10-41　在 720 个时间步长时（活塞处于下死点）的气缸静温分布图

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
第 10 章 动网格模型模拟
11 P224
12 P248
13 P254



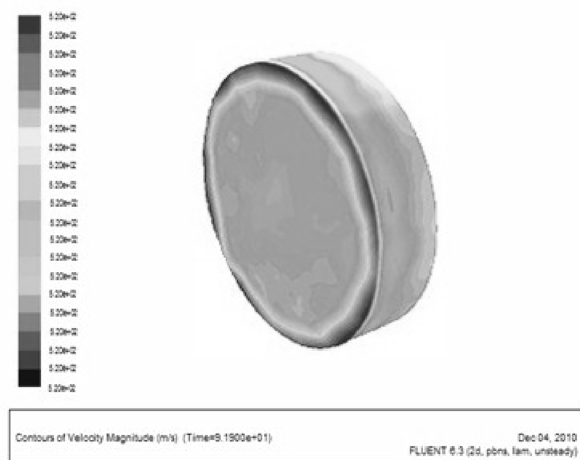


图 10-42　在 360 个时间步长时（活塞处于上死点）的气缸静温分布图

19 执行 Solve→Animate→Playback 命令，弹出如图 10-43 所示的 Playback 对话框。在 Playback Mode 下拉列表框中选择 Play Once；End Frame 微调框选择 720；在 Sequences 列表中选择 temperature，动画播放控键同时被激活，单击播放键后即开始播放动画。

20 执行 Surface→Iso-Surface 命令，弹出如图 10-44 所示的 Iso-Surface 对话框。从 Surface of Constant 下拉列表框中选择 Grid/X-Coordinate；单击 Compute 按钮将在 Min 文本框与 Max 文本框中分别显示 X 坐标的最小与最大值；Iso-Values 文本框取 0；New Surface Name 文本框取名 x=0。单击 Create 按钮，即创建 X=0 处的截面。

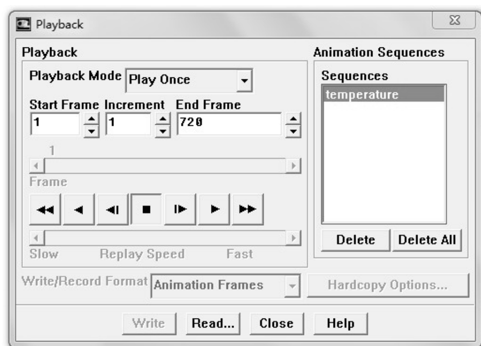


图 10-43　设置动画播放

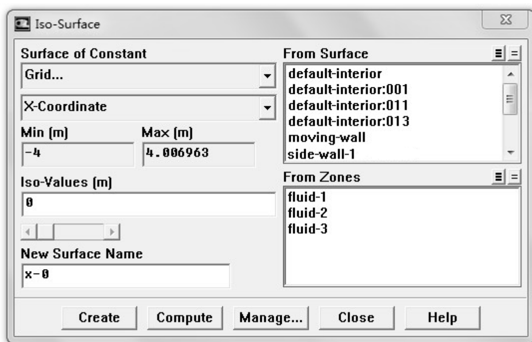


图 10-44　创建缸内 X=0 处截面的对话框

21 执行 Display→Vector，弹出如图 10-45 所示的 Vectors 对话框。Vectors of 下拉列表框中选择 Velocity 和 Velocity Magnitude；Surfaces 列表框中选择 x=0；Style 下拉列表框中选择 arrow，Scale 文本框取 1.2。

22 执行 Dispaly→Grid，弹出如图 10-46 所示的 Grid Display 对话框。Options 选框中选择 Faces；Surfaces 列表框中选择 moving-wall、side-wall-1、side-wall-2、side-wall-3、top-wall。

如果想要变化网格颜色，可以单击 Colors…按钮，弹出如图 10-47 所示 Grid Colors 对话框。Types 列表框中选择 wall，Colors 列表框中选择 yellow，单击 Close 按钮关闭对话框。

23 执行 Display→Scene，弹出如图 10-48 所示的 Scene Description 对话框。Names 列



表框中选择 side-wall-1、side-wall-2、side-wall-3、top-wall。单击 Display 按钮，打开如图 10-49 所示的 Display Properties 对话框，调整 Transparency 的滚动条为 56，单击 Apply 按钮。此时，上死点位置截面的速度矢量图如图 10-50 所示。

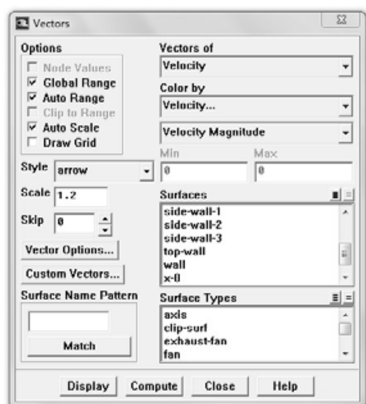


图 10-45　Vectors 对话框

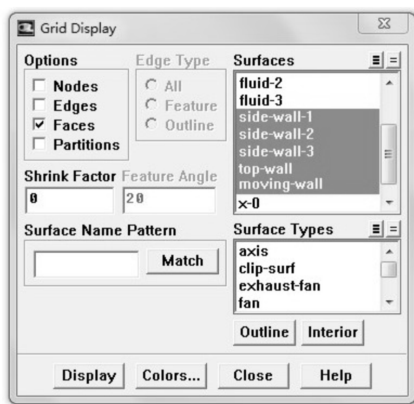


图 10-46　Grid Display 对话框

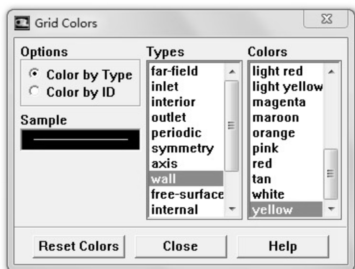


图 10-47　Grid Colors 对话框

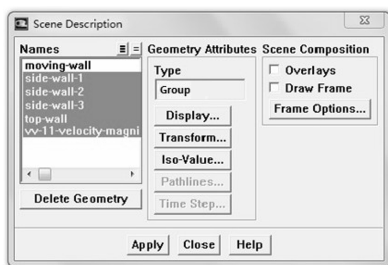


图 10-48　Scene Description 对话框

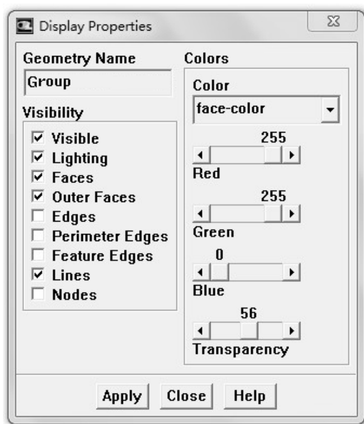


图 10-49　Display Properties 对话框

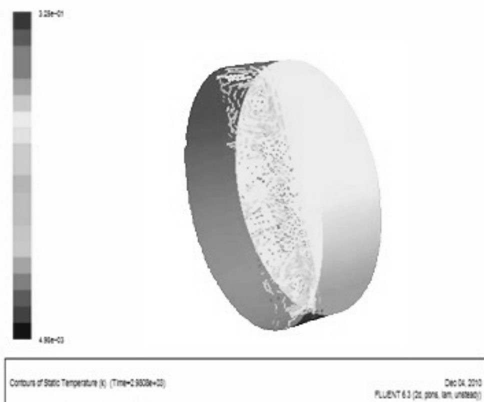


图 10-50　上死点位置截面的速度矢量图

24 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 valve.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 jump.dat。

25 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT6.3。

第 11 章　物质运输和有限速率化学反应模型模拟

FLUENT软件强大的化学反应模拟能力可以通过求解描述每种组成物质的对流、扩散和反应源的守恒方程来模拟混合和输运，还可以模拟多种同时发生的化学反应和复杂的燃烧。例如，用FLUENT软件来模拟氮氧化合物（NO_x）和其他污染物的形成扩散，分析污染物的浓度组分；还可以模拟发生在大量相（容积反应）中，或是壁面、微粒的表面的反应（煤粉的燃烧）。

FLUENT 软件提供了多种模拟反应的模型，包括有限速率模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型、部分预混燃烧模型以及 PDF 输运方程模型。本章将具体介绍化学反应的各种模型。

本章主要讲述了有限速率化学反应模型和燃烧模型的基本思想和应用范围，具体介绍了有限速率化学反应模型和燃烧模型的设置解决方法，并通过组分传输和燃烧模拟的实例帮助读者了解利用 FLUENT 软件解决该类模型的操作，为实际处理相关问题打下基础。

11.1　有限速率化学反应

11.1.1　化学反应模型概述

1．层流有限速率模型

层流有限速率模型使用 Arrhenius 公式计算化学源项，忽略湍流脉动的影响。这一模型对于层流火焰是准确的，但由于湍流火焰中 Arrhenius 化学动力学的高度非线性，这一模型一般不精确。对于化学反应相对缓慢、湍流脉动较小的燃烧，如超音速火焰是可以接受的。

化学物质 i 的化学反应净源项通过其参加的N_R个化学反应的Arrhenius反应源的和计算得到。

$$R_i = M_{w,i}\sum_{i=1}^{N_r}\hat{R}_{i,r} \tag{11-1}$$





其中，$M_{w,i}$ 是第 i 种物质的分子量；$\hat{R}_{i,r}$ 为第 i 种物质在第 r 个反应中的产生分解速率。反应可能发生在连续相反应的连续相之间，或是在表面沉积的壁面处，或是发生在一种连续相物质的演化中。

考虑以如下形式写出的第 r 个反应：

$$\sum_{i=1}^{N} \nu'_{i,r} M_i \xleftrightarrow[k_{b,r}]{} \sum_{i=1}^{N} \nu''_{i,r} M_i \tag{11-2}$$

式中，N 为系统中化学物质数目；$\nu'_{i,r}$ 为反应 r 中反应物 i 的化学计量系数；$\nu''_{i,r}$ 为反应 r 中生成物 i 的化学计量系数；M_i 为第 i 种物质的符号；$k_{b,r}$ 为反应 r 的正向速率常数；$k_{b,r}$ 为反应 r 的逆向速率常数。

式（11−2）对于可逆和不可逆反应都适用。对于不可逆反应，逆向速率常数 $k_{b,r}$ 简单地被忽略。

式（11−2）中的和是针对系统中的所有物质，但只有作为反应物或生成物出现的物质才有非零的化学计量系数。因此，不涉及的物质将从式中清除。

反应 r 中物质 i 的产生/分解摩尔速度以如下公式给出：

$$\hat{R}_{i,r} = \Gamma\left(\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}\right)\left(k_{f,r}\prod_{j=1}^{N_r}\left[C_{j,r}\right]^{\eta'_{j,r}} - k_{b,r}\prod_{j=1}^{N_r}\left[C_{j,r}\right]^{\eta''_{j,r}}\right) \tag{11-3}$$

式中，N_r 为反应 r 的化学物质数目；$C_{j,r}$ 为反应 r 中每种反应物或生成物 j 的摩尔浓度；$\eta'_{j,r}$ 为反应 r 中每种反应物或生成物 j 的正向反应速度指数；$\eta''_{j,r}$ 为反应 r 中每种反应物或生成物 j 的逆向反应速度指数；Γ 表示第三体对反应速率的净影响。

Γ 项由下式给出：

$$\Gamma = \sum_{j}^{N_r} r_{j,r} C_j \tag{11-4}$$

其中，$r_{j,r}$ 为第 r 个反应中第 j 种物质的第三体影响。在默认状态，FLUENT软件在反应速率计算中不包括第三体影响。但是当有它们的数据时，可以选择包括第三体影响。

反应 r 的在向速率常数 $k_{f,r}$ 通过Arrhenius公式计算。

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \tag{11-5}$$

式中，A_r 为指数前因子（恒定单位）；β_r 为温度指数（无量纲）；E_r 为反应活化能；R 为气体常数。

对于FLUENT问题，数据库可以确定提供 $\nu'_{i,r}, \nu''_{i,r}, \eta'_{j,r}, \eta''_{j,r}, \beta_r, A_r, E_r$，并可选择提供 $r_{j,r}$。

如果反应是可逆的，逆向速率常数 $k_{b,r}$ 可以根据以下关系从正向速率常数计算。

$$k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r} \tag{11-6}$$

其中，K_r 为平衡常数，从下式计算。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
第 11 章 物质运输和有限速率化学反应模型模拟
12 P248
13 P254

$$K_r = \exp\left(\frac{\Delta S_r^0}{R} - \frac{\Delta H_r^0}{RT}\right)\left(\frac{p_{\mathrm{atm}}}{RT}\right)^{\sum_{r=1}^{Nf}\left(v''_{j,v} - v'_{j,r}\right)} \tag{11-7}$$

其中，p_{atm} 表示大气压力（101325Pa）。指数函数中的项表示 Gibbs 自由能的变化，其各部分按下式计算。

$$\frac{\Delta S_r^0}{R} = \sum_{i=1}^{N}(v''_{i,r} - v'_{i,r})\frac{S_i^0}{R} \tag{11-8}$$

$$\frac{\Delta H_r^0}{RT} = \sum_{i=1}^{N}(v''_{i,r} - v'_{i,r})\frac{h_i^0}{RT} \tag{11-9}$$

其中，S_i^0 和 h_i^0 是标准状态的熵和标准状态的焓（生成热）。这些值在 FLUENT 软件中作为混合物材料的属性指定。

2．涡耗散模型

该模型下的大部分燃料燃烧速度很快，其反应速率由混合湍流控制。在非预混火焰中，湍流缓慢地通过对流/混合燃料和氧化剂进入反应区，在反应区它们快速地燃烧。在预混火焰中，湍流对流/混合冷的反应物和热的生成物进入反应区，在反应区迅速地发生反应。在这样的情况下，燃烧受到混合限制，过程变得复杂，其中可以忽略掉未知化学反应的动力学速率。

FLUENT 软件提供了湍流-化学反应相互作用模型，基于 Magnussen 和 Hjertager 的工作，称为涡耗散模型。

反应 r 中物质 i 的产生速率 $R_{i,r}$ 由下面两个表达式中较小的一个给出。

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A\rho\frac{e}{k}\min_{\mathrm{R}}\left(\frac{Y_R}{v'_{R,r}M_{\omega,R}}\right) \tag{11-10}$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} AB\rho\frac{e}{k}\frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N v''_{j,r}M_{\omega,j}} \tag{11-11}$$

在式（11-10）和式（11-11）中，化学反应速率由大涡混合时间尺度 k/ε 控制，如同 Spalding 的涡破碎模型一样。只要湍流出现（$k/\varepsilon>0$），燃烧即可进行，不需要点火源来启动燃烧。这通常对于非预混火焰是可接受的，但在预混火焰中，反应物进入计算区域（火焰稳定器上游）就开始燃烧。实际上，Arrhenius 反应速率作为一种动力学开关，阻止反应在火焰稳定器之前发生。一旦火焰被点燃，涡耗散速率通常会小于 Arrhenius 反应速率，并且反应是混合限制的。

尽管 FLUENT 软件允许采用涡耗散模型和有限速率/涡耗散模型的多步反应机理（反应数大于 2），但可能会产生不正确的结果。原因是多步反应机理基于 Arrhenius 速率，每个反应都不一样。在涡耗散模型中，每个反应都有同样的湍流速率，因而模型只能用于单步（反应物—产物）或是双步（反应物—中间产物，中间产物—产物）整体反应。模型不能预测化学动力学控制的物质，如活性物质。为合并湍流流动中的多步化学动力学机理，使用 EDC 模型。



3．LES 的涡耗散模型

当使用 LES 湍流模型时，湍流混合速率（式（11−10）和式（11−11）中的 k/ε）被亚网格尺度混合速率替代。计算公式为

$$\left|\bar{S}\right| \equiv \sqrt{2\bar{S}_{ij}\ \bar{S}_{ij}} \tag{11−12}$$

4．涡−耗散−概念模型

涡−耗散−概念（EDC）模型是涡耗散模型的扩展，以在湍流流动中包括详细的化学反应机理。它假定反应发生在小的湍流结构中，称为良好尺度。良好尺度的容积比率按下式模拟。

$$\xi^* = C_{\varepsilon}\left(\frac{\nu \in}{k^2}\right)^{3/4} \tag{11−13}$$

式中，*表示良好尺度数量；C_{ε} 为容积比率常数=2.1377；ν 为运动粘度。

认为物质在好的结构中，经过一个时间尺度

$$\tau^* = C_{\tau}\left(\frac{\nu}{\in}\right)^{1/2} \tag{11−14}$$

后开始反应。

其中，C_{τ}为时间尺度常数，等于 0.4082。

在 FLUENT 软件中，良好尺度中的燃烧视为发生在定压反应器中，初始条件取为单元中当前的物质和温度。经过一个 τ^* 时间的反应后物质状态记为 Y_i^*。

物质 i 的守恒方程中的源项计算公式为

$$R_i = \frac{\rho(\xi^*)^2}{\tau^*[1-(\xi^*)^3]}(Y_i^* - Y_i) \tag{11−15}$$

EDC 模型能在湍流反应流动中合并详细的化学反应机理。但是，典型的机理具有不同的刚性，它们的数值积分计算开销很大。因此，只有在快速化学反应假定无效的情况下才能使用这一模型，如在快速熄灭火焰中缓慢的 CO 烧尽、在选择性非催化还原中的 NO 转化。

推荐使用双精度求解器，以避免刚性机理中固有的大指数前因子和活化能产生的舍入误差。

（1）壁面表面反应和化学蒸汽沉积　对于气相反应，反应速率是在容积反应的基础上定义的，化学物质的形成和消耗成为物质守恒方程中的一个源项。沉积的速率由化学反应动力和流体到表面的扩散速率控制。壁面表面反应因此在丰富相中创建了化学物质的源（和容器），并决定了表面物质的沉积速率。

FLUENT 软件把沉积在表面的化学物质与气体中的相同化学物质分开处理。类似地，涉及沉积的表面反应定义为单独的表面反应，因而其处理也与涉及相同化学物质的丰富相反应不同。表面反应采用的连续方法在高 Knudsen 数（非常低压力下的流动）下不适用。

（2）颗粒表面反应　颗粒反应速率 R 可以表示为

$$R = D_0(C_g - C_s) = R_c(C_s)^N \tag{11−16}$$

式中，D_0 为扩散系数；C_g 大量物质中的平均反应气体物质浓度（kg/m^3）；C_s 颗粒表面的平均反应气体物质浓度（kg/m^3）；R_c 化学反应速率系数；N 显式反应级数（无维）。

在式（11−16）中，颗粒表面处的浓度C_s是未知的，因此需要消掉，表达式改写为

$$R = R_c\left[C_g - \frac{R}{D_0}\right]^N \tag{11−17}$$

这一方程需要通过一个迭代过程求解，除去 $N=1$ 或 $N=0$ 的特例。当 $N=1$ 时，式（11−17）可以写为

$$R = \frac{C_g R_c D_0}{D_0 + R_c} \tag{11−18}$$

在 $N=0$ 情况下，如果在颗粒表面具有有限的反应物浓度，固体损耗速度等于化学反应的速度。如果在表面没有反应物，固体损耗速度根据扩散控制速率突然变化。在这种情况下，出于稳定性的考虑，FLUENT 软件采用化学反应速率。

▷▷▷ 11.1.2　有限速率化学反应的设置

1．选定物质输送和反应，并选择混合物材料

执行 Define→Models→Species…命令，弹出 Species Model 对话框，如图 11−1 所示。

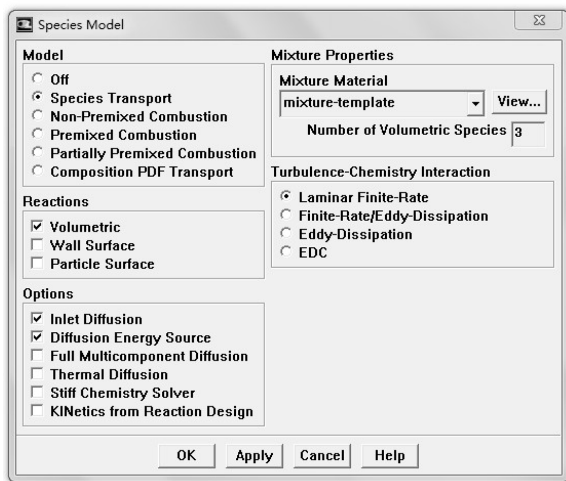


图 11−1　Species Model 对话框

（1）在 Model 选框中，选择 Species Transport。

（2）在 Reactions 选框中，选择 Volumetric。

（3）在 Mixture Properties 选项组的 Mixture Material 下拉列表框中选择问题中希望使用的混合物材料。

下拉列表框中包括所有在当前数据库中定义的混合物。要检查一种混合物材料的属性，应选择它，并单击 View 按钮。如果希望使用的混合物不在下拉列表框中，则选择混合物模板（Mixture-template）材料。



（4）在 Turbulence-Chemisitry Interaction 选框中选择湍流-化学反应相互作用模型，可以使用 4 种模型。

- 层流有限速率（Laminar Finite-Rate）：只计算 Arrhenius 速率，并忽略湍流-化学反应相互作用。
- 涡耗散模型（Eddy-Dissipation）：只计算混合速率。
- 有限速率/涡耗散模型（Finite-Rate/Eddy-Dissipation）：计算 Arrhenius 速率和混合速率，并使用其中较小的一个。
- EDC 模型（湍流流动）：使用详细的化学反应机理模拟湍流-化学反应相互作用。

2. 定义混合物的属性

执行 Define→Materials…命令，在 Materials 对话框中，选择 Material Type 为混合物。单击 Mixture Species 右边的 Edit 按钮打开 Species 对话框，如图 11-2 所示。

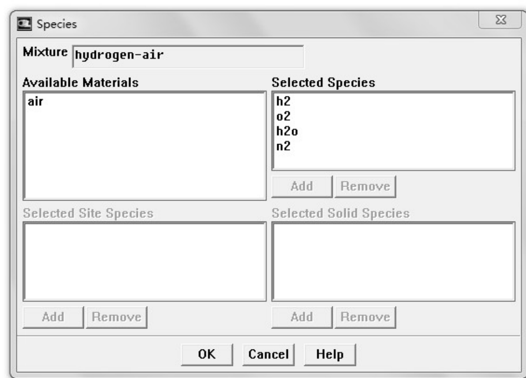


图 11-2　Species 对话框

在 Species 对话框中，已选物质 Selected Species 列表显示所有混合物中的流体相物质。如果模拟壁面或微粒表面反应，已选物质 Selected Species 列表将显示所有混合物中的表面物质。表面物质是那些从壁面边界或离散相微粒(如 Si(s))产生或散发出来的，以及在流体相物质中不存在的物质。

3. 定义反应

如果 FLUENT 软件模型中涉及化学反应，则可以接着定义参与的已定义物质的反应。在 Materials 对话框的 Reaction 下拉列表框中显示适当的反应机理，依赖于在 Species Model 对话框中选择的湍流-化学反应相互作用模型。如果使用层流有限速率或 EDC 模型，则反应机理将是有限速率的；如果使用涡耗散模型，反应机理将是涡耗散的；如果使用有限速率/涡耗散模型，反应机理将是有限速率/涡耗散的。

为定义反应，单击 Reaction 右侧的 Edit 按钮，将打开 Reactions 对话框。

定义反应的步骤如下：

（1）在 Total Number of Reactions 微调框中设定反应数目（容积反应、壁面反应和微粒表面反应），使用箭头改变数值，或输入值并按〈Enter〉键。

（2）如果是流体相反应，保持默认选项 Volumetric 作为反应类型。如果是壁面反应或者颗粒表面反应，则选择 Wall Surface 或 Particle reaction 作为反应类型。

（3）通过增加 Number of Reactants 和 Number of Products 的值指定反应中涉及的反应物和生成物的数量。在 Species 下拉列表框中选择每一种反应物或生成物，然后在 Stoich. Coefficient 和 Rate Exponent 区域中设定它的化学计量系数和速率指数，如图 11-3 所示。

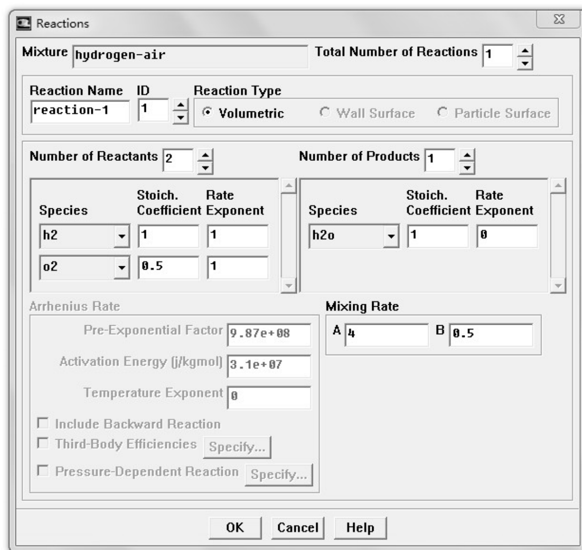


图 11-3　Reactions 对话框

4．定义化学物质的其他源项

（1）刚性层流化学反应系统的求解　当使用层流有限速率模型模拟层流反应系统时，可能需要在反应机理是刚性的时候使用耦合求解器。另外，可以通过使用 stiff-chemistry 文本命令为耦合求解器提供进一步的求解稳定性。


注意

stiff-chemistry 选项在非耦合求解器中是没有的，它只能用于耦合求解器（隐式的或显式的）。

（2）EDC 模型求解

1）用涡耗散模型和简单的单步或两步放热机理计算一个初始解。

2）用适当的物质使能 EDC 化学反应机理。

3）如果物质的数目和反应顺序改变，将需要改变物质边界条件。

4）不选择 Species Model 对话框中的 Volumetric 复选框可以暂时取消反应计算。

5）在 Solution Controls 对话框中使能物质方程的求解。

6）对物质混合场计算一个解。

7）打开 Species Model 对话框中的 Volumetric 复选框，选定反应计算，并在 Turbulence-Chemistry Interaction 选框中选择 EDC 模型。

8）在 Solution Controls 对话框中使能 Energy 方程的求解。

9）对复合了物质和温度的场计算一个解。如果火焰吹熄，可能还需要补缀一个高温区域。



10）打开所有方程。

11）计算最终解。

5．从 CHEMKIN 导入化学反应机理

如果有一个 CHEMKIN 格式的气相化学反应机理，则可以使用 CHEMKIN Mechanism Import 对话框将机理文件导入 FLUENT 软件或执行 File→Imput→CHEMKIN Mechanism 命令，如图 11–4 所示。

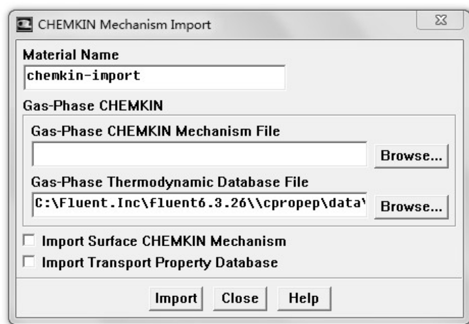


图 11–4　CHEMKIN Mechanism Import 对话框

在 CHEMKIN Mechanism Import 对话框中，在 CHEMKIN Mechanism Flie 文本框中输入 CHEMKIN 文件的路径（如路径/file.che），并指定 Thermodynamic Database File(THERMO.DB) 的位置。

▷▷▷ 11.1.3　PDF 输运模型

PDF 输运模型用有限速率化学反应模型计算湍流火焰。PDF 输运模型用概率密度函数法模拟湍流流动，可以模拟火焰的点火过程和火焰的消失过程，但是 PDF 输运模型消耗的系统资源很大，因此计算中不应该使用太多的网格点，最好将计算限于二维情况。PDF 输运模型计算仅能用分离算法进行，并且不能用于模拟变化的热传导过程。

PDF 输运模型的设置和计算过程如下：

（1）在 CHEMKIN Mechanism（CHEMKIN 反应机制）对话框中，读入 CHEMKIN 文件中的气相反应模型。CHEMKIN Mechanism（CHEMKIN 反应机制）对话框的启动方法为单击 File→Import→CHEMKIN Mechanism...命令。

（2）启用湍流模型。在 Viscous Model（粘性模型）对话框中，选择计算中使用的湍流模型。Viscous Model 对话框的启动方法为单击 Define→Models →Viscous...命令。

（3）启用 PDF 输运模型并设置相关参数。首先启动 Species Model（组元模型）对话框，启动方法为单击 Define→Models→Species...命令。

然后选择 Composition PDF Transport（组合物 PDF 输运）模型。选中后，Species Model 对话框会扩展显示与 PDF 模型相关的输入选项。在 Species Model 对话框的 Reactions（反应）选项组中，选择 Volumetric（体积），单击 Integration Parameters（积分参数）按钮打开 Integration Parameter（积分参数）对话框。在这个对话框上设置 ODE 积分容限和 ISAT 积分参数。默认设置的积分参数可以满足大部分计算的要求，因此如果对积分过程没有特殊的要求，可以保持默认值不变。最后在 Species Model 对话框中，选择粒子混合模型，即选择

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
第 11 章 物质运输和有限速率化学反应模型模拟
12 P248
13 P254

Modified Curl（改进的卷曲）模型，或 IEM（与平均流进行交换的相互干扰）模型。

（4）在 Materials（材料）对话框中检查材料性质，并在 Reactions 对话框中检查反应参数。

（5）设置操作条件（Operating Conditions）和边界条件（Boundary Conditions）。

（6）检查求解器设置。在 Solution Controls（求解过程控制）对话框中的 PDF Transport Parameters（PDF 输运参数）下面，设置 Particles per cell（每个网格中的粒子数量）和 Local Time Stepping（当地时间步长）参数。

（7）初始化流场，在需要的时候可以用补丁（Patch）的方式在流场中定义一个高温区用于点火。

（8）设置求解过程监视器，然后开始迭代求解。在低速流中，燃烧通过密度与流场流动耦合起来。蒙特卡罗（Monte Carlo）PDF 输运算法给予密度场随机扰动，并进而形成对整个流场的扰动。在定常流动计算中，随机扰动对稳定性的破坏作用可以通过预迭代过程的平均作用予以减弱。在计算中，流场经常在温度场和组元浓度场收敛之前就已经“收敛”。为了解决这个问题，可以适当调整流场收敛判据，同时在 Flux Reports（通量报告）对话框中确认 Total Heat Transfer Rate（总的热交换速率）已经达到平衡。同时，建议在出口边界上监视温度场和组元浓度场的变化，保证温度和组元浓度在出口边界上也已经达到稳定状态。

在默认设置中，FLUENT 软件每进行一次有限体积迭代就进行一次 PDF 计算。在实际计算过程中，有限体积迭代和 PDF 计算的步数都可以进行调整。增加 Iterations in Time Average（时间平均计算的迭代步数），流场的扰动会被光滑掉。默认设置的 50 步迭代可以适用于多数算例。如果需要逐步减少残差，则可以将 Time AverageIncrement（时间平均增量）设为 0～1 之间的一个数（推荐设置为 0.2），后续计算将根据这项设置增加时间平均计算的迭代步数。

（9）对计算结果进行后处理。在计算结束后，除了能对静温、组元质量浓度等变量进行文字和图像的后处理外，还可以跟踪 PDF 计算过程中的粒子，即在 Particle Tracks（粒子跟踪）面板中，选择 Track PDF Transport Particles（跟踪 PDF 输运粒子），然后单击 Display（显示）按钮，就可以观察 PDF 输运粒子的运动轨迹。

11.2 燃烧模型

FLUENT 软件可以模拟宽广范围内的燃烧（反应流）问题，该软件包含多种燃烧模型、辐射模型及与燃烧相关的湍流模型，适用于各种复杂情况下的燃烧问题，包括固体火箭发动机和液体火箭发动机中的燃烧过程、燃气轮机中的燃烧室、民用锅炉、工业熔炉及加热器等。燃烧模型是 FLUENT 软件优于其他 CFD 软件的最主要的特征之一。

11.2.1 燃烧模型概述

1．气相燃烧模型

（1）有限速率模型　该模型求解反应物和生成物输运组分方程，并由用户来定义化学反应机理。反应率作为源项在组分输运方程中通过 Arrhenius 方程或涡耗散模型。有限速率模型适用于预混燃烧、局部预混燃烧和非预混燃烧。 该模型可以模拟大多数气相燃烧问题，在航空航天领域的燃烧计算中有广泛的应用。



（2）PDF 模型　该模型不求解单个组分输运方程，但求解混合组分分布的输运方程。各组分浓度由混合组分分布求得。PDF 模型尤其适合于湍流扩散火焰的模拟和类似的反应过程。在该模型中，用概率密度函数 PDF 来考虑湍流效应。该模型不要求用户显式地定义反应机理，而是通过火焰面方法(即混即燃模型)或化学平衡计算来处理，因此比有限速率模型有更多的优势。该模型应用于非预混燃烧（湍流扩散火焰），可以用来计算航空发动机的环形燃烧室中的燃烧问题及液体/固体火箭发动机中的复杂燃烧问题。

（3）非平衡反应模型　层流火焰模型是混合组分PDF模型的进一步发展，从而用来模拟非平衡火焰燃烧。在模拟富油一侧的火焰时，典型的平衡火焰假设失效。该模型既可以模拟形成NO_x的中间产物，还可以模拟火箭发动机的燃烧问题和RAMJET及SCRAMJET的燃烧问题。

（4）预混燃烧模型　该模型专用于燃烧系统或纯预混的反应系统。在此类问题中，充分混合的反应物和反应产物被火焰面隔开。通过求解反应过程变量来预测火焰面的位置。湍流效应可以通过层流和湍流火焰速度的关系来考虑。该模型可以用来模拟飞机加力燃烧室中的复杂流场模拟、汽轮机、天然气燃炉等。

2．分散相燃烧模型

除了可以模拟各种气相燃烧问题以外，FLUENT 6.3 还提供了模拟分散相燃烧问题(液体燃料燃烧、喷射燃烧、固体颗粒燃烧等)的燃烧模型。

- 在拉格朗日坐标下，模拟分散相（包括固体颗粒、油滴、气泡等）在瞬态和稳态下的运动轨迹。
- 多种球形和非球形粒子的曳力规律。
- 线性分布或 Rosin-Rammler 方程的粒子大小分布。
- 连续相的湍流效应对粒子传播的影响。
- 分散相的加热或冷却。
- 液滴的汽化和蒸发。
- 燃烧粒子，包括油滴的挥发过程和焦炭的燃烧。
- 连续相与分散相的耦合。
- 模拟油滴在湍流的影响而产生的扩散效应时，FLUENT 软件可以采用粒子云模型和随机轨道模型。

在 FLUENT 软件中，需定义油滴在初始状态的位置、速度、尺寸和温度分布及油滴的物性，根据这些设置计算粒子的轨迹和传热/传质，并可以计算粒子与连续相的相互影响。FLUENT 软件中还提供了丰富的关于粒子运动中曳力、汽化、喷射、破碎、碰撞等子模型，供用户来选择。计算得到的粒子的轨迹和传热/传质可以通过图形界面和文本界面显示出来。

3．污染模型

（1）NO_x模拟　FLUENT软件提供了 3 种NO_x形成的模型，包括Thermal NO_x、Prompt NO_x和Fuel NO_x形成模型。从而可以模拟绝大多数情况下的NO_x生成问题。

（2）烟尘模型（Soot Model）　FLUENT 软件可以考虑单步和两步的烟尘生成问题。烟尘的燃烧由有限速率模型模拟，并考虑了烟尘对辐射吸收的影响。

4．热辐射模型

（1）Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)模型　DTRM 模型的优点是简单，且可以



适用的计算对象的尺度范围较大，其缺点是没有包含散射和不能计算非灰气体辐射。提高模型中射线的数量可以提高 DTRM 模型的精度，但计算量也明显增加。

（2）P-1 模型　P-1 模型是 P-N 模型的简化，适用于大尺度辐射计算。对比 DTRM 模型，其优点在于计算量更小，且包含散射效应。当燃烧计算域的尺寸比较大时，P-1 模型非常有效。另外，P-1 模型可应用在较为复杂的计算域中。

（3）Rosseland 模型　Rosseland 模型是最为简化的辐射模型，只能应用于大尺度辐射计算。其优点是速度最快，需要内存最少。

（4）Discrete Ordinates (DO) 模型　DO 模型是所有 4 种模型中最为复杂的辐射模型，从小尺度到大尺度辐射计算都适用，且可计算非灰气体辐射和散射效应，但需要较大计算量。

综上所述，无论在模型数量上，还是在模型先进性上，FLUENT 软件提供了远远优于其他商用 CFD 软件的燃烧模型。例如，在气相燃烧模型上，Star-CD 仅仅提供了传统的有限速率模型和 PDF 模型，而缺乏在航空航天领域燃烧问题中应用最为广泛的非平衡火焰模型和预混模型；在分散相模型上，与 Star-CD 相比，FLUENT 软件同样提供了更为丰富、更为先进的物理模型。

▷▷▷ 11.2.2　燃烧模型的计算方式

燃烧计算分为非预混燃烧、预混燃烧和部分预混燃烧 3 种。

1．非预混燃烧

适用于燃料和氧化剂分别来自不同入口的情况，也就是说燃料和氧化剂在燃烧前没有进行过混合，这就是所谓“非预混”的含义。非预混燃烧计算中不使用有限速率化学反应模型，而是用统一的混合物浓度作为未知变量进行求解，因此计算中无需计算代表组元生成或消失的源项，计算速度比有限速率化学反应模型要快，但是非预混燃烧计算需要流场满足一定的条件，即流场必须为湍流，化学反应过程的持续时间非常短，燃料、氧化剂必须来自不同的入口等。在燃料入口和氧化剂入口之外，非预混燃烧允许存在第三个流动入口，这个入口可以是燃料、氧化剂，也可以是不参与燃烧反应的第三种流体的入口。

非预混燃烧计算使用的化学反应模型包括火焰层近似（Flame Sheet Approximation）、平衡流计算和层流火苗（Flamelet）模型 3 种模型。火焰层近似模型假设燃料和氧化剂在相遇后立刻燃烧完毕，即反应速度为无穷大，其优点是计算速度快，缺点是计算误差较大，特别是对于局部热量的计算可能超过实际值。平衡流计算是用吉布斯自由能极小化的方法求解组元浓度场，这种方法的优点是既避免了求解有限速率化学反应模型，又能够比较精确地获得组元浓度场。层流火苗模型则将湍流火焰燃烧看做由多个层流区装配而成，而在各层流子区中可以采用真实反应模型，从而大大提高计算精度。

非预混燃烧计算中湍流计算采用的是时均化 N-S 方程，湍流与化学反应的相关过程用概率密度函数（PDF）逼近。计算过程中组元的化学性质用 FLUENT 软件提供的预处理程序 prePDF 进行计算处理。计算中采用的化学反应模型可以是前面所述 3 种模型中的一种。计算结束后将计算结果保存在查阅（Look-up）表格中，FLUENT 软件在计算非预混燃烧时则直接从查阅表格中调用数据。

非预混燃烧包括单一混合物浓度计算（Single-Mixture-Fraction Approach）和双混合物浓度计算（Two-Mixture-Fraction Approach）。大致步骤如下：



（1）启动 FLUENT6.3 并读入网格文件。

（2）选择使用非预混燃烧模型　首先在 Viscous Model（粘性计算模型）对话框中选用湍流计算。如果计算采用的是非绝热模型，则还需要在计算中加入热交换计算等内容。然后在 Species Mode（l 组元模型）对话框中选择 Non-Premixed Combustion（非预混燃烧），单击 OK 按钮后，系统会自动打开一个文件选择对话框，从中可以选择由 prePDF 创建的 PDF 文件。如果需要在计算中引入压缩性效应，则可以返回 Species Model（组元模型）对话框，在左下角单击选中 Compressibility Effects（压缩性效应）。

（3）定义边界条件　非预混燃烧边界条件的特殊之处在于混合物浓度在边界上的定义。通常平均燃料混合物的浓度在燃料入口，浓度值为 1，在氧化剂入口为 0；氧化剂则正好相反，即在燃料入口为 0，在氧化剂入口为 1，也就是假设燃料入口和氧化剂入口流入的是纯净的燃料或氧化剂。

（4）定义物理性质　在指定使用非预混模型后，流体介质即被自动设定为 pdf-mixture（pdf 混合物），其成分已经在 prePDF 中指定，并且在 FLUENT 中无法更改。在 FLUENT 的 Materials（材料）对话框中只能修改粘度、热导率等输运性质。

（5）开始流场计算　流场计算开始前，先在 Species Model（组元模型）对话框中确认各项参数设置无误，特别是需要采用的 PDF 函数形式等项与预期目的相符后，就可以进行初始化，然后开始迭代计算了。如果计算不收敛，则可以尝试适当调整亚松弛因子重新开始计算。

2．预混燃烧模型

预混燃烧即燃烧前燃料和氧化剂已经充分混合了的燃烧。预混燃烧的火焰传播速度取决于层流火焰传播速度和湍流对层流火焰的相干作用。湍流中的旋涡结构可以使火焰锋面发生变形、起皱，进而影响火焰传播速度。在预混燃烧中，燃烧反应的反应物和燃烧的生成物被火焰区截然分开。

在 FLUENT软件中预混燃烧必须使用分离算法，并且只能用于湍流、亚声速流动计算。预混燃烧模型不能与氮氧化物（NO_x）模型同时使用，但是可以与部分预混模型同时使用。预混燃烧不能用于模拟带化学反应的弥散相粒子，但是可以模拟带惰性粒子的流动计算。

预混燃烧模型计算的设置和求解过程如下：

（1）启用预混湍流燃烧模型并设置相关参数　单击 Define→Models→Species...命令，在 Species Model（组元）对话框中选择 Premixed Combustion（预混燃烧）模型，并在下面选择 Adiabatic（绝热）或 Non-Adiabatic（非绝热）。

（2）定义未燃烧材料的物理性质　单击 Define→Materials...命令，在这里定义与预混燃烧有关的混合物性质，包括 Laminar Flame Speed（层流火焰传播速度）、Critical Rate of Strain（临界应变率）、Heat of Combustion（燃烧放热）等。

（3）设置过程变量 c 在流场入口和出口处的值　单击 Define→Boundary Conditions...命令，在流场的入口和出口处设置过程变量 c，对于未燃烧混合物 c=0，对于已燃炖混合物 c=1。

（4）初始化过程变量　单击 Solve→Initialize→Patch....命令，可以在全流场将 c 值设为 1（已燃），然后让未燃混合物（c=0）从流场入口进入流场，并将火焰推回到火焰稳定器处。另一个比较好的选择是在驻燃区上游用补丁（Patch）方式将 c 值设为 0（未燃），在下游设

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
第 11 章 物质运输和有限速率化学反应模型模拟
12 P248
13 P254



为 1（已燃）。

（5）求解流场并进行后处理。

3．部分预混燃烧模型

部分预混燃烧模型是非预混燃烧模型和预混燃烧模型的综合体，计算中火焰锋面的位置用过程变量 c 计算，在锋面后面（c=1）是已燃的混合物，锋面前面（c=0）则是未燃的混合物。部分预混燃烧模型适用于混合物混合不充分的燃烧计算。

部分预混燃烧的设置和求解流程如下：

（1）在使用 prePDF 创建 PDF 查阅表格时，基本流程与非预混燃烧相同，区别在于在 Define Case（定义算例）对话框中选择的选项是 Partially Premixed Model（部分预混模型）。

（2）在 FLUENT6.3 中读入网格文件，并设置好计算中要用到的其他模型，如湍流模型、辐射模型等。

（3）在 Species Model 对话框中激活 Partially Premixed Combustion（部分预混燃烧）模型。如果有必要，可以在对话框中修改 Model Constants（模型常数）。在单击 OK 按钮后，文件选择窗口会自动打开，在这里选择由 prePDF 创建的包含查阅表格的 PDF 文件。

（4）在 Materials（材料）对话框中，定义计算域中未燃材料的物理性质。

（5）作为边界条件，在流场入口和出口处设置过程变量 c 和平均混合物浓度及其增量的值。

（6）初始化过程变量，单击 Solve→Initialize→Patch...命令。

（7）开始计算，计算结束后对感兴趣的变量进行后处理。

▷▷▷ 11.2.3　燃烧模拟的设置

1．初始设置

（1）确定物理模型的应用范围。

（2）划分计算网格（必要时应根据初步计算结果调整网格疏密）。

（3）确定求解量和计算收敛判据。

2．Boundary conditions（边界条件）的设置

燃烧问题通常对进口边界条件十分敏感，利用已知的（或合理的）速度和标量分布作为边界条件是必要的，壁面传热对于整个计算也是很重要的，应指定壁面温度，而非指定边界条件中的内部对流、辐射等。

3．Initial conditions（初始条件）的设置

尽管稳态问题的解不依赖于初始条件，但很差的初始条件会导致问题不能收敛（由于输运方程的数量和非线性）。对一些燃烧问题，可先求解冷态问题，以此为初始条件求气相燃烧问题，然后求解离散相问题，再求解有辐射的问题。对强旋流，应逐渐增加其涡旋度。

4．Underrelaxation Factors（松弛因子）的设置

（1）松弛的效果是针对高度非线性问题的。

（2）使用混合物分数 PDF 模型时应松弛密度（0.5）。

（3）对高浮力流应松弛速度。

（4）对高速流动应松弛压力。

（5）一旦获得稳定解，应尝试增加所有量的松弛因子以尽可能地接近默认值。



5．Discretization（离散）

首先以一阶精度的方法离散控制方程，收敛后再以二阶精度离散以提高计算结果的精度，对三角形或四边形网格，二阶离散是尤为必要的。

6．Discrete Phase Model(离散相模型)

为增强计算的稳定性，应使用粒子云模型或者提高 DPM 的气相迭代数。

7．Magnussen Model（涡耗模型）

有限速率/涡耗散方法(Arrhenius/Magnusson) 的默认方法，对非预混（扩散）火焰，应关闭有限速率方法选项；预混火焰需要 Arrhenius 项，因此反应物早期不燃烧；可能需要高温初始化/补丁（Initialization/Patch），使用依赖于温度的等压比热 Cp 以减少高温时的不合理性。

8．Mixture fraction PDF model

（1）适合于所研究的问题符合该模型的假设。

（2）在 PDF 表中使用足够的离散点以保证插值的精确（在不增加计算时间的前提下）。

（3）使用β函数 PDF。

9．Turbulence

（1）应首先由 standard k-model 开始计算。

（2）再转化到 RNG k-，Realizable k-或雷诺应力模型（RSM）以获得与试验数据较一致的分析结果，从而保证对湍流模型的敏感性。

10．Judging Convergence

（1）收敛残差应小于 10^{-3}，其中对温度、组分等标量应小于 10^{-6}。

（2）质量和能量通量必须保证平衡。

（3）应监控感兴趣的变量（如出口的平均温度）。

（4）保证流场变量的等值线光滑、可靠和稳定。

11.3　组分传输和化学反应模型实例

下面通过两个实例简要介绍组分传输和化学反应模型的具体应用方法。

11.3.1　气体燃烧温度场模拟

1．实例概述

在一个燃烧塔中，氢气以 90m/s 的速度从顶部喷口进入塔身，塔中空气流动速度为 0.4m/s，且过量的空气系数为 1.28。氢气在空气中燃烧，生成水。本例中将用 FLUENT 6.3 演示燃烧后的温度分布云图，图 11−5 为燃烧塔内基本模型。

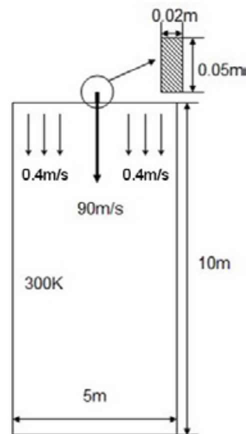


图 11−5　燃烧塔内基本模型

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 建立燃烧塔矩形剖面，单击 Geometry→Face→Create Real Rectangular Face，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 文本框和 Height 文本框中输入数值 5 和 10，单击 Apply 按钮生成大矩形面。

03 建立喷口矩形面域，单击 Geometry →Face →Create Real Rectangular Face ，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 文本框和 Height 文本框中输入数值 0.02 和 0.05，单击 Apply 按钮生成小矩形面。

04 将喷口移动到燃烧塔顶部，单击 Geometry →Face →Move/Copy Faces ，在 Move/Copy Faces 面板中选择小矩形面，选择 Move 和 Translate，沿 Y 轴方向上移 5.025，单击 Apply 按钮。

05 将两个矩形面合并，单击 Geometry →Face →Unite Faces ，选择两个矩形面，单击 Apply 按钮，即将两个矩形面合并为一个面，如图 11−6 所示。

3．网格的划分

01 单击 Mesh →Face →Mesh Faces ，打开 Mesh Faces 面板，选中合并后的面域，划分方式为 Quad、Map、Interval size-0.05，单击 Apply 按钮，完成网格划分，如图 11−7 所示。

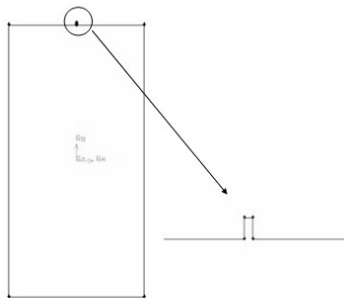


图 11−6　合并后的矩形面



图 11−7　面域的网格划分

02 单击 Zones →Specify Boundary Types ，在 Specify Boundary Types 对话框中选择小矩形上边界，类型为 VELOCITY_INLET，命名为 h-inlet；选择大矩形上边界，类型为 VELOCITY_INLET，命名为 air-inlet；大矩形的下边界，类型为 PRESSURE_OUTLET，命名为 out；其余边界类型为 WALL，命名为 wall。

03 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 burning.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4．求解计算

01 双击 FLUENT 6.3 图标，弹出 FLUENT Version 对话框，选择 2d（二维单精度）计算器，单击 Run 按钮启动 FLUENT6.3。

02 执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 burning.msh。

03 执行 Grid→Check 命令，检查网格文件。

04 执行 Define→Models→Energy...命令，勾选 Energy Equation 选项。

05 执行 Define→Models→Viscous…命令，在弹出的 Viscous Model 对话框中选择 k-epsilon[2 eeqn]，其他选项保持默认值。

06 执行Define→Models→Species→Transport&Reaction…命令，弹出如图 11−8 所示的 Species Model对话框，选择Model中的Species Transport单选按钮，勾选Volumetric复选框，在 Turbulence-Chemistry Interaction中选择Eddy-Dissipation单选按钮，启动涡耗散模型。然后在



Mixture Material下拉列表框中选择hydrogen-air，单击OK按钮会弹出一个如图 11-9 所示的Information对话框，提示材料结构发生改变，需要进一步确定性能参数。再次回到Species Model对话框，单击Mixture Material旁边的Edit…按钮，弹出Material对话框，单击Mixture Species旁边的Edit…按钮，出现如图 11-10 所示的Species对话框，其中的Selected Species列表框中的组分已经按照质量分数递增的顺序排列，单击OK按钮回到Material对话框。单击Reaction旁边的Edit…按钮，出现如图 11-11 所示的Reactions对话框。本例中选用了一个化学反应方程：$2H_2+O_2 \rightarrow 2H_2O$，在Reaction对话框中可以看出反应组分和比例，保持默认值，单击OK按钮。

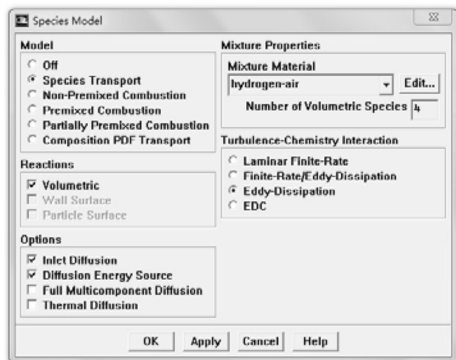


图 11-8　Species Model 对话框

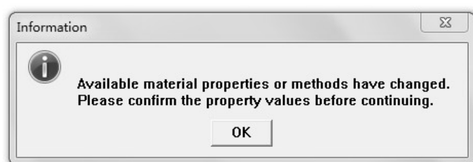


图 11-9　Information 对话框

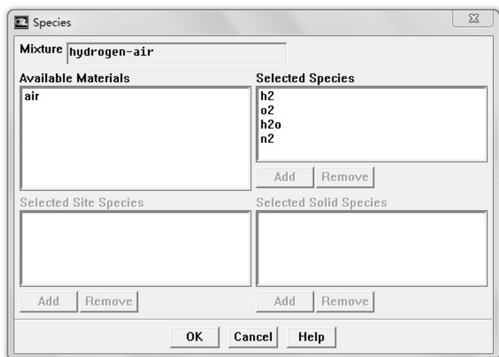


图 11-10　Species 对话框

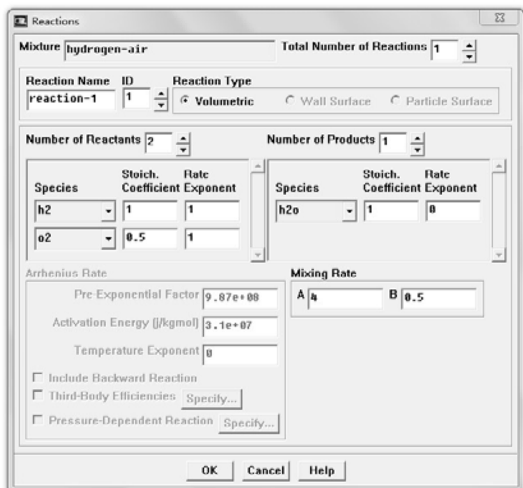


图 11-11　Reactions 对话框

07 执行 Define→Material 命令，在 Materials Type 下拉列表框中选择 fluid，由于燃烧过程中的比热容随着温度的变化而变化，所以分别将 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中的 h2，n2，o2，h2o 的 Cp 选择为 Piecewise-Polynomial（分段多项式），弹出如图 11-12 所示的 Piecewise-Polynomial Profile 对话框，保持默认值，单击 OK 按钮，回到 Materials 对话框中单击 Change/Create 按钮。

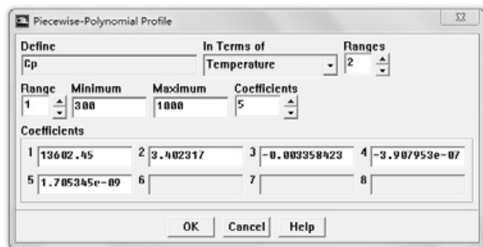


图 11-12 Piecewise-Polynomial Profile 对话框

08 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。

❶ 设置 air-inlet 的边界条件。选择 air-inlet，单击 Set…按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，在 Momentum 标签中，选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame 下拉列表框选择 Absolute。Velocity Magnitude 文本框为 0.4m/s。Turbulence 选项组中的 Specification Method 下拉列表框选择 Intensity and Hydraulic Diameter，Hydraulic Diameter 文本框为 0.44，其他保持默认值，如图 11-13 所示。接着选择 Thermal 标签，温度保持 300K。选择 Species 标签，在 Species Mass Fractions 选项组中的 o2 文本框填入 0.22，其他保持默认值，如图 11-14 所示。单击 OK 按钮完成。

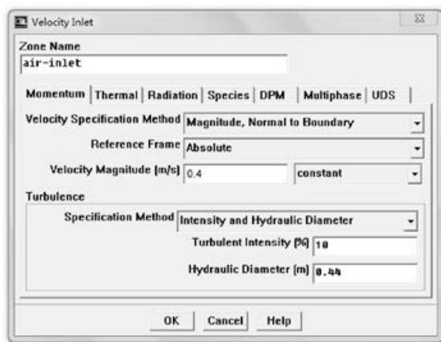


图 11-13 Air 进口动量参数设置

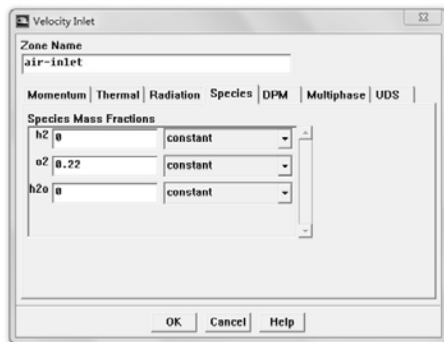


图 11-14 Air 进口组分设置

❷ 设置 h-inlet 的边界条件。同上，选择 h-inlet，单击 Set…按钮，弹出 Velocity Inlet 对话框，在 Momentum 标签中，选择 Velocity Specification Method 的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”Reference Frame 下拉列表框选择 Absolute。Velocity Magnitude 文本框为 90m/s。Turbulence 选项组中的 Specification Method 下拉列表框选择为 Intensity and Hydraulic Diameter，Hydraulic Diameter 文本框为 0.01，其他保持默认值。接着选择 Thermal 标签，温度保持 300K。选择 Species 标签，在 Species Mass Fractions 选项组中的 h2 文本框填入 1（纯氢气进入），其他保持默认值，单击 OK 按钮。

❸ 设置 out 的边界条件。选择 out，单击 Set…按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，在 Momentum 标签中，保持 Gauge Pressure 文本框为 0，Backflow Direction Specification Method 下拉列表框为 Normal to Boundary。Turbulence 选项组中的 Specification Method 下拉列表框选择为 Intensity and Hydraulic Diameter，Back flow Hydraulic Diameter 文本框为 0.45，其他保持默认值，如图 11-15 所示。接着选择 Thermal 标签，温度保持 300K。选择 Species 标签，在 Species Mass Fractions 选项组中的 o2 文本框填入 0.22，其他保持默认值，如图 11-16 所示。单击 OK 按钮完成。



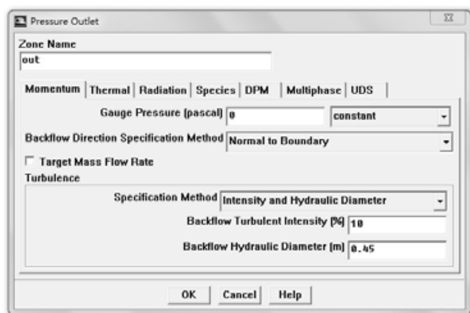


图 11-15　压力出口动量参数设置

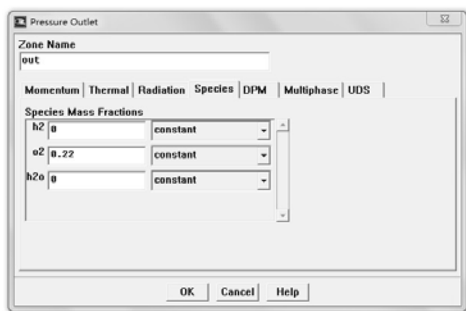


图 11-16　压力出口组分设置

❹ 设置 wall 的边界条件。选择 out，单击 Set…按钮，弹出 WALL 对话框，在 Thermal 标签中，设置 Thermal Condition 为 Temperature，保持 300K 不变，单击 OK 按钮。

09 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出 Solution Controls 对话框，保持默认值。

10 对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

11 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选择 Plot，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

12 执行 Solve→Iterate…命令，在弹出的 Iterate 对话框中设置 Number of Iterations 为 500，其他保持默认值，单击 Iterate 按钮即可开始解算。

13 执行 Display→Contours…命令，弹出 Contours 对话框，在 Contours of 下拉列表框中选择 Temperature 和 Static Temperature，勾选 Filled，单击 Display 按钮，即出现温度分布云图，如图 11-17 所示。再改选 Species 和 Mass Fraction of h2，单击 Display 按钮，出现氢气质量分布云图，如图 11-18 所示。选择 Properties 和 Cp，单击 Display 按钮，出现定压比热容分布云图，如图 11-19 所示。

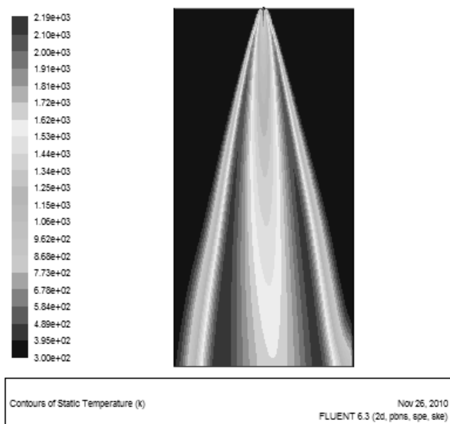


图 11-17　温度分布云图

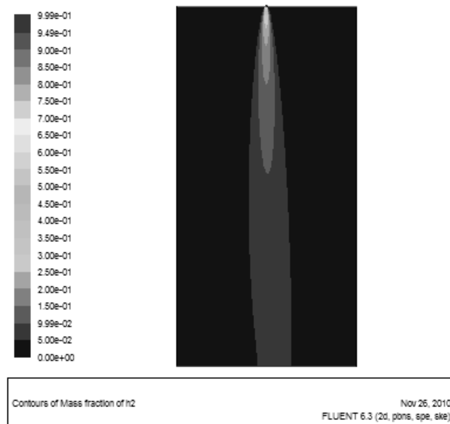


图 11-18　氢气质量分布云图

14 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 burning.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 burning.dat。

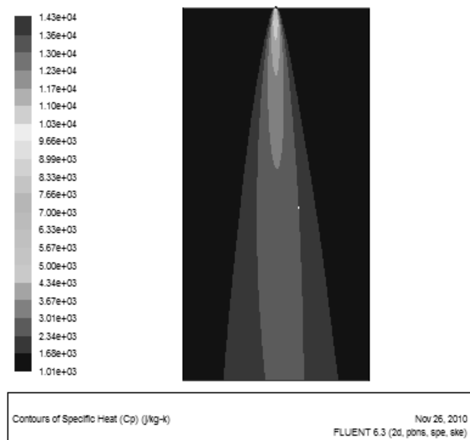


图 11−19　定压比热容分布云图

15 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT6.3。

▷▷▷ 11.3.2　废气排放组分浓度模拟

人类在生产和生活过程中经常会排出废气。特别是化工厂、钢铁厂、制药厂以及炼焦厂和炼油厂等，排放的废气气味大，严重污染环境和影响人体健康。废气中含有污染物种类很多，其物理和化学性质非常复杂，毒性也不尽相同。燃料燃烧排出的废气中含有二氧化硫、氮氧化物（NO_x）、碳氢化合物等；因工业生产所用原料和工艺不同，而排放各种不同的有害气体和固体废物，含有各种组分如重金属、盐类、放射性物质；汽车排放的尾气含有铅、苯和酚等碳氢化合物。下面利用FLUENT6.3 来模拟工厂废气在空气中的排放情况。

1．实例概述

某化工厂的排气烟筒直径为 1m，每天以 20m/s的速度向大气中排放含有CO_2、CO和SO_2（CO_2占 87%；CO占 10%；SO_2占 3%）的废气，烟筒口处的温度有 300 ℃大气平均温度为 25 ℃风速为 5m/s。取一个足够大的扩散区域（100m×100m），模拟废气在该区域内的扩散状况，如图 11−20 所示。

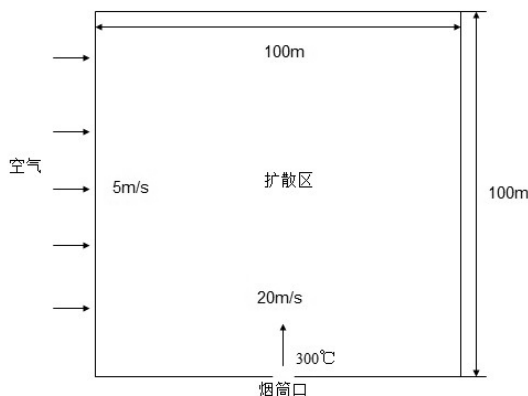


图 11−20　几何模型



2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 建立点，单击 Geometry→Vertex→Create Real Vertex，在 Create Real Vertex 对话框的 x、y、z 坐标文本框中输入（0，0，0）、（49.5，0，0）、（50.5，0，0）、（100，0，0）、（0，100，0）、（100，100，0）、（45，30，0）、（55，30，0）、（40，100，0）、（60，100，0），建立 10 个基本点。

03 单击 Geometry→Edge→Create Straight Edge，在 Create Straight Edge 对话框中选择点单击 Apply 按钮，生成 12 条线。

04 单击 Geometry→Face→Create Face From Wireframe，在 Create Face From Wireframe 对话框的 Edges 黄色文本框中选取所需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何平面。本例中共建立了 3 个区域面，如图 11-21 所示。

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Edge→Mesh Edges，在 Mesh Edges 对话框的 Edges 黄色文本框中选中 1、3、6、8、9、10 号 6 条线段。选用 Interval Count 的方式，划分为 75 个间隔，单击 Apply 按钮。再选择 4、5 号线段，选用 Interval Count 的方式，划分为 125 个间隔；选择 11、12 号线段，划分为 50 个间隔；7 号线段划分为 60 个间隔；2 号线段划分为 20 个间隔。

02 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选中中间面域，划分方式为 Tri、Pave，其他保持默认值，单击 Apply 按钮。选取左右两个面域，才有 Quad 和 Map 的划分方式，单击 Apply 按钮，完成网格划分，如图 11-22 所示。

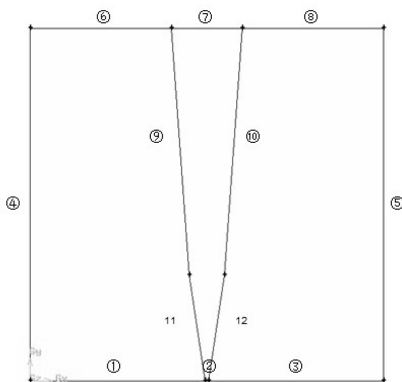


图 11-21　计算区域面

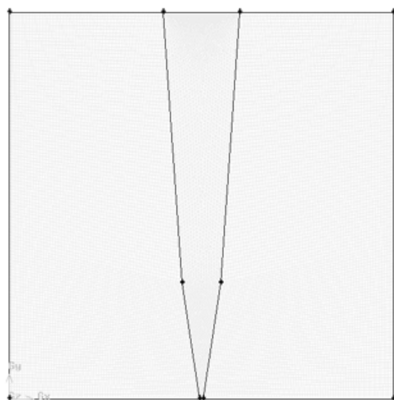


图 11-22　面域的网格划分

03 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 对话框中选择下端烟筒口，类型为 VELOCITY_INLET，命名为 p-inlet；选择面域左边界，类型为 VELOCITY_INLET，命名为 air-inlet；面域的上面 3 条线段以及右边界，类型为 PRESSURE_OUTLET，命名为 out-1、out-2、out-3 和 out-r；其余边界类型为 WALL，命名为 wall。

04 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 pollution.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
第 11 章 物质运输和有限速率化学反应模型模拟
12 P248
13 P254

4．求解计算

01 双击 FLUENT 6.3 图标，弹出 FLUENT Version 对话框，选择 2d（二维单精度）计算器，单击 Run 按钮启动 FLUENT 6.3。

02 执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 pollution.msh。

03 执行 Grid→Check 命令，检查网格文件。

04 执行 Define→Models→Energy...命令，勾选 Energy Equation 选项。

05 执行 Define→Models→Viscous…命令，在弹出的 Viscous Model 对话框中选择 k-epsilon[2 eqn]，并勾选 Full Buoyancy Effects，其他选项保持默认值。

06 执行 Define→Material 命令，单击 FLUENT Database 按钮从中选择 sulfur-dioxide[so2]，顺序单击 Copy、Change/Create、Close 按钮。

07 执行Define→Models→Species→Transport&Reaction…命令，弹出Species Model对话框，选择Species Transport，在Mixture Material的下拉列表框中选择carbon-monoxide-air，单击OK按钮。回到Species Model对话框，单击Mixture Material旁边的Edit…，弹出Material对话框，单击Mixture Species旁边的Edit…按钮，出现如图 11-23 所示的Species对话框，其中的Selected Species列表框中的组分已经按照质量分数递增的顺序排列，因为本例中所选的物质还有SO_2，而且CO_2占 87%；CO占 10%；SO_2占 3%，所以按照质量分数比需要重新排列组分顺序。选中需要移出的组分，单击Remove按钮，再按照质量分数从小到大的顺序依次添加到Selected Species列表框中。空气放在最下端，单击OK按钮回到Material对话框。单击Change按钮保存设置，再单击Close按钮。

08 执行 Define→Operating Conditions…命令，在如图 11-24 所示的 Operating Conditions 对话框中勾选 Gravity，设置 Gravitational Acceleration 中 Y[m/s2]为–9.81。

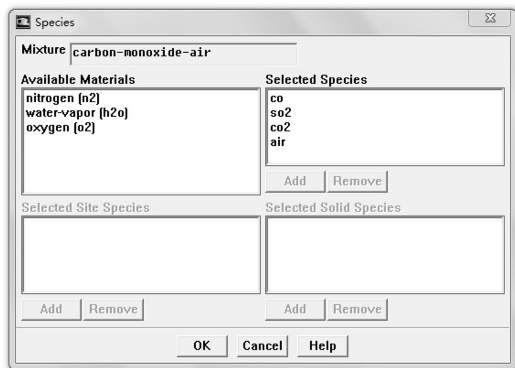


图 11-23　Species 对话框

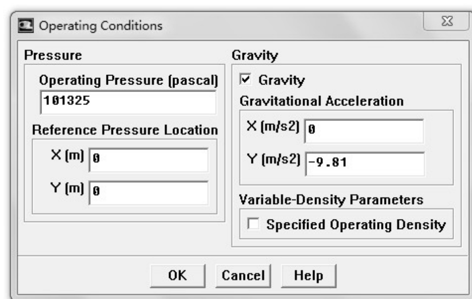


图 11-24　Operating Conditions 对话框

09 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。

1）设置p-inlet的边界条件。选择p-inlet，单击Set…按钮，弹出Velocity Inlet对话框，在Momentum标签中，选择Velocity Specification Method的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame下拉列表框选择Absolute。Velocity Magnitude文本框为 20m/s。Turbulence选项组中的Specification Method下拉列表框选择为Intensity and Hydraulic Diameter，Hydraulic Diameter文本框为 0.1，其他保持默认值，如图 11-25 所示。接着选择



Thermal标签，温度保持 573K。选择Species标签，在Species Mass Fractions选项组中的SO_2文本框填入 0.03，CO为 0.1，CO_2为 0.87，其他保持默认值，单击OK按钮。

2）设置wind-in的边界条件。同上，选择wind-in，单击Set…按钮，弹出Velocity Inlet对话框，在Momentun标签中，选择Velocity Specification Method的方式为“Magnitude，Normal to Boundary”，Reference Frame下拉列表框选择Absolute。Velocity Magnitude文本框为 5m/s。Turbulence选项组中的Specification Method下拉列表框选择为Intensity and Hydraulic Diameter，Hydraulic Diameter文本框为 100，其他保持默认值，如图 11-26 所示。接着选择Thermal标签，温度保持 298K。选择Species标签，Species Mass Fractions选项组中的SO_2、CO、CO_2文本框中保持 0（空气中少量的CO_2忽略不计），其他保持默认值，单击OK按钮。

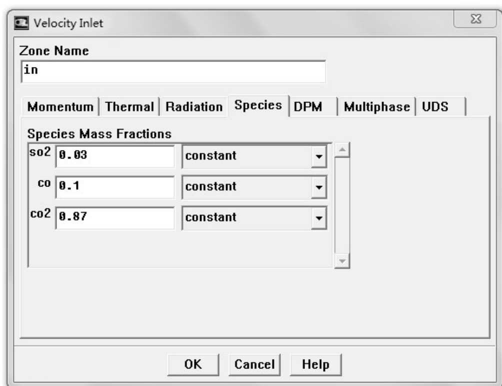


图 11-25　烟筒出口组分设置

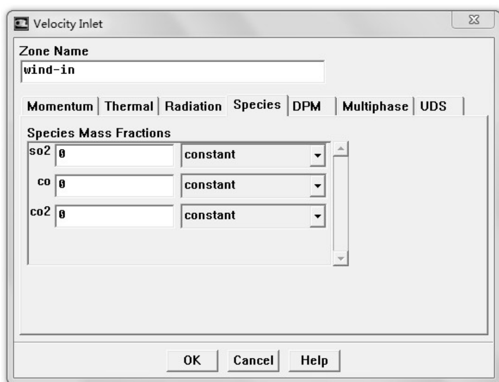


图 11-26　wind 进口组分设置

3）设置 out 的边界条件。

① 选择 out-1，单击 Set…按钮，弹出 Pressure Outlet 对话框，在 Momentum 标签中，保持 Gauge Pressure 文本框为 0，Turbulence 选项组中的 Specification Method 下拉列表框选择为 Intensity and Hydraulic Diameter，Backflow Hydraulic Diameter 文本框为 40，其他保持默认值。接着选择 Thermal 标签，温度保持 298K。选择 Species 标签，在 Species Mass Fractions 中的各值保持 0，其他保持默认值，如图 11-27 所示。单击 OK 按钮完成。

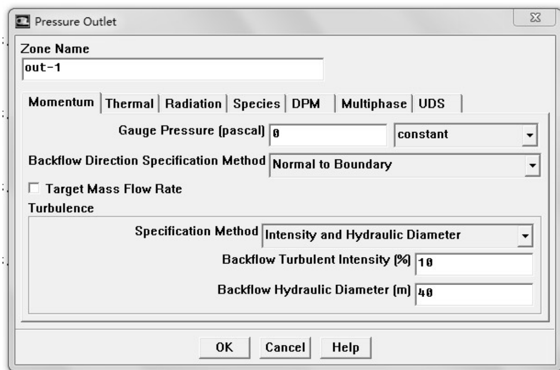


图 11-27　压力出口动量参数设置

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
第 11 章 物质运输和有限速率化学反应模型模拟
12 P248
13 P254



② 回到 Boundary Conditions 对话框，选择 out-2，与 out-1 的设置相同，只是将 Hydraulic Diameter 文本框中的值改为 20。out-3 也是将 Hydraulic Diameter 文本框中的值改为 40；out-r 将 Hydraulic Diameter 文本框中的值改为 100。

10 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出 Solution Controls 对话框，保持默认值。

11 对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialization 对话框中选择 all-zones，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

12 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选择 Plot，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

13 执行 Solve→Iterate…命令，在弹出的 Iterate 对话框中设置 Number of Time Steps 为 1000，其他保持默认值，单击 Iterate 按钮即可开始求解。

14 执行Display→Contours…命令，弹出Contours对话框，在Contours of下拉列表框中选择Pressure和Static Pressure，勾选Filled，单击Display按钮，即出现压强分布云图，如图 11-28 所示。再改选Species和Mass Fraction of SO_2，单击Display按钮，出现二氧化硫的浓度分布云图，如图 11-29 所示。将SO_2改为CO，就得到一氧化碳的浓度分布图，同理得到二氧化碳的浓度分布图，如图 11-30 和图 11-31 所示。

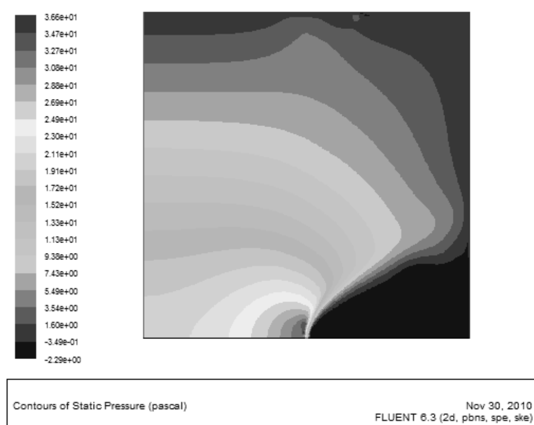


图 11-28　压强分布云图

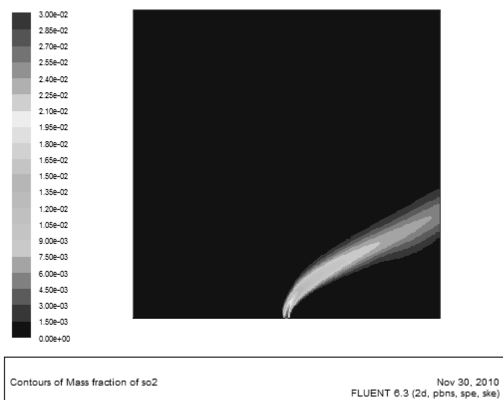


图 11-29　二氧化硫的浓度分布云图

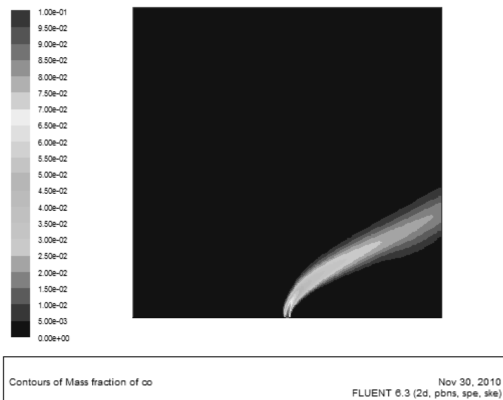


图 11-30　一氧化碳的浓度分布图



15 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 pollution.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 pollution.dat。

16 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

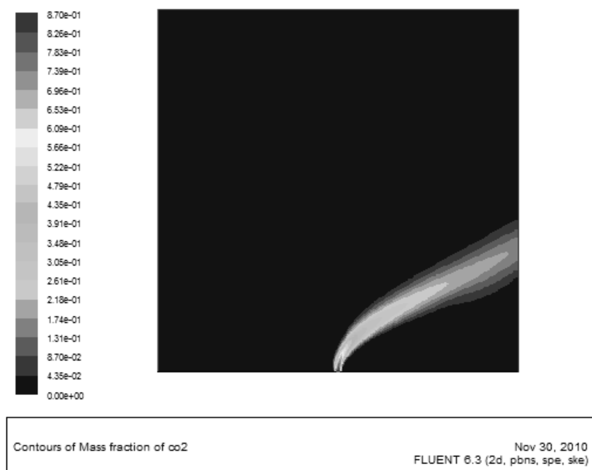


图 11-31　二氧化碳的浓度分布图

第 12 章 并行计算

FLUENT 软件的并行计算就是利用多个处理器同时进行计算，它可将网格分割成多个子域，子域的数量是计算节点的整数倍(如 8 个子域可对应于 1、2、4、8 个计算节点)。每个子域(或子域的集合)就会存在不同的计算节点上。有可能是并行机的计算节点，或是运行在多个 CPU 工作平台上的程序，或是运行在用网络连接的不同工作平台(UNIX 平台或是 Windows 平台)上的程序。计算信息传输率的增加将导致并行计算效率的降低，因此在作并行计算时选择求解问题很重要。

本章主要对 FLUENT 软件并行计算的特点和使用步骤进行了介绍，帮助读者了解了检查和修改并行配置的工具，使读者能够使用专用并行机或通过工作平台的网格运行 FLUENT 软件，为读者进一步熟悉使用 FLUENT 软件做了补充。

12.1 开启并行求解器

在 Windows 系统下，可通过 MS-DOS 窗口开启 FLUENT 软件专用并行版本，如在 x 处理器上开启并行版本，可输入 FLUENT version –t x。在提示命令下，将 version 替换为求解器版本(2d、3d、2dpp、3ddp)，将 x 替换为处理器的数量(如 FLUENT 3d –t3 是在 3 台处理器上运行 3D 版本)。有两种方法在 Windows 工作平台网络上运行 FLUENT 软件：一种是用 RSHD 传输装置软件；另外一种是采用硬件支持的信息传输接口(VMPI)软件，具体内容参考 Windows 并行安装说明书。

采用 RSHD 软件进行网络传输的，需要在命令提示符中输入：

FLUENT version -pnet [-path sharename] [-cnf= hostfile] -t nprocs

采用硬件支持的 MPI 软件进行网络传输的，需要在命令提示符中输入：

FLUENT version –pvmpi [-path sharename] [-cnf= hostfile] -t nprocs

12.2 使用并行网络工作平台

利用网络上连接的工作平台引入(杀掉)计算节点可以形成一个虚拟并行机。即使一个工作平台仅有一个 CPU，也允许有多个计算节点共同存在。

1．配置网络

若想将计算节点引入到几台机器上，或是对当前网络配置进行一些修改(如当启动求解器时发现主机上引入了太多的计算节点)，可执行 Parallel Network Configure...命令。



在网络结构中，计算节点的标签从 0 开始顺序增加。除计算节点外，还有一个主机节点。FLUENT 软件启动时主机节点也自动启动，而退出 FLUENT 软件时它也随之被关闭。在 FLUENT 软件运行时不能被关掉，而计算节点随时都可以关闭，节点 0 除外，因为它是最后一个计算节点，主机总是引入节点而节点 0 引入所有其他节点。

2．引入计算节点

引入计算节点的基本步骤如下：

（1）在 Available Hosts 列表框中选取要引入节点的主机。如果所需要的机器未被列出，则可以在 Host Entry 里手工增加一个主机，或是从 host database 中复制所需要的主机。

（2）在 Spawn Count 中为每个被选主机设置计算节点数。

（3）单击 Spawn 按钮，新的节点就会被引入，并被添加到 Spawned Compute Nodes 列表中。

3．主机文件操作

（1）主机数据库　建立工作平台的并行网络时，很容易生成局域网机器列表(“hosts file”)，将包含这些机器名的文件加载到主机数据库，然后单击 Parallel Network Database...(或单击 Network Configuration 控制面板上的 Database...按钮)，利用 Hosts Database 控制面板，在工作平台上选择那些组成并行配置(或网络)的主机。如果主机文件 FLUENT.hosts 或 FLUENT.hosts 在根目录里，它里面的内容将在程序启动时自动加载到主机数据库里，否则主机数据库为空，直到读入一个主机文件。

（2）读取主机文件　如果已有包含局域网内机器列表的主机文件，则可以单击 Load...按钮，在弹出的 Select File 对话框中选中此文件，将其加载到 Hosts Database 控制面板里。当文件被读入后，主机名字就会被显式在 Hosts 列表中(FLUENT 软件自动添加每台可识别机器的 IP 地址，如果某台机器不在当前局域网内，它将被标注 unknown)。

（3）将主机复制到 Network Configuration 控制面板　若想将 Hosts Database 控制面板内的 Hosts 复制到 Network Configuration 控制面板中 Available Hosts 列表，则选择列表中所需复制的名字，单击按钮，被选中的主机就会被添加到节点机器的 Available Hosts 列表中。

4．检测网络连通性

对任何计算节点，都可以查看网络连通性信息，如主机名、体系结构、操作 ID、被选节点 ID 以及所有被连接的计算机。被选节点的 ID 用星号标识。FLUENT 软件主进程的 ID 总是主机，计算节点则从 node-0 开始按顺序排列，所有计算节点都被连接在一起，计算节点 0 被连接到主进程。为了获得某计算节点的连通性信息，可单击 Parallel Show Connectivity...按钮，也可以在 Network Configuration 控制面板中查看某个计算节点的连通性，方法是在 Spawned Compute Nodes 列表中选择此节点，然后单击 Connectivity 按钮。

12.3 分割网格

在用 FLUENT 软件的并行求解器时，需要将网格细分割为几组单元，以便在分离处理器上求解。将未分割的网格读入并行求解器中，可用系统默认的分割原则，还可以在连续求解器中或将 mesh 文件读入并行求解器后自己分割，如图 12-1 所示。



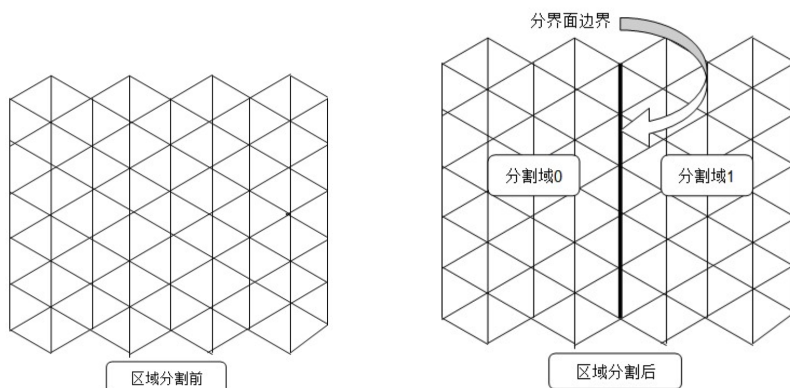


图 12−1　网格分割

1．自动分割网格

并行求解器中自动分割网格的步骤如下。

（1）执行 Parallel→Auto Partition…命令，在弹出的 Auto Partition Grid 对话框中设置分割参数，如图 12−2 所示。

在读入 mesh 文件或 case 文件时，如果没有获取分割信息，则可以保持 Case File 选项开启，FLUENT 软件会用 Method 下拉菜单里的方法分割网格。

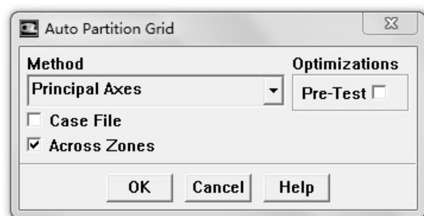


图 12−2　Auto Partition Grid 对话框

设置分割方法和相关选项的步骤如下：

1）关闭 Case File 选项，就可以选择对话框中的其他选项。

2）在 Method 下拉菜单里选取两分方法。

3）可为每个单元分别选取不同的网格分割方法，也可以利用 Across Zones 让网格分割穿过区域边界。推荐不采用对单元进行单独分割(关闭 Across Zones 按钮)，除非是溶解过程需要不同区域上的单元输出不同的计算信息(主区域包括固体和流体区域)。

4）若选取 Principal Axes 或 Cartesian Axes 方法，则可以在实际分割之前对不同两分方向进行预测试以提高分割性能。

5）单击 OK 按钮。

如果 case 文件已经网格分割，且网格分割的数量和计算节点数一样，则可以在 Auto Partition Grid 控制面板中默认选择 Case File 选项，这会让 FLUENT 软件在 case 文件中应用分割。

（2）读入 case 文件，方法是在菜单栏中单击 File Read Case...命令。



1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
第 12 章 并行计算
13 P254

2．手动分割网格

手动分割网格时推荐采用如下步骤：

（1）用默认的两分方法(Principal Axes)和优化方法(Smooth)分割网格。

（2）检查分割统计表　在开启负载平衡(单元变化)时，主要是使球形接触面曲率和接触面曲率变量最小。

（3）一旦确定问题采用最佳两分方法，如果需要就可以开启 Pre-Test 以提高分割质量。

（4）如果需要，则可用 Merge 优化提高分割质量。

具体步骤：执行 Parallel→Partition...命令，弹出 Partition Grid 对话框，从中可设置所有相关的输入参数，如图 12-3 所示。

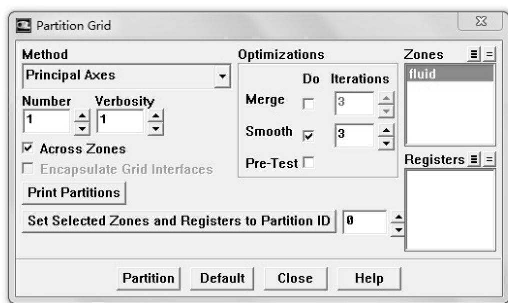


图 12-3　Partition Grid 对话框

3．网格分割方法

并行程序的网格分割有 3 个主要目标：

- 生成等数量单元的网格分割。
- 使分割的接触面数最小——减小分割边界面积。
- 使分割的邻域数最小。

平衡分割(平衡单元数)可确保每个处理器有相同的负载，分割被同时传输。既然分割之间的传输强烈依赖于时间，那使分割的接触面数最小就可以减少数据交换的时间。使分割的邻域数最小，可减少网络繁忙，而且对那些初始信息传输比较长、信息传输耗时间的机器来说尤为重要，特别是对依靠网络连接的工作站来说非常重要。

FLUENT 软件中的分割格式是采用两分法的原则来进行的，但不像其他格式那样需要分割数，它对分割数没有限制，对每个处理器都可以产生相同分割数(也就是分割总数是处理器数量的倍数)。

（1）两分法　网格采用两分法进行分割。被选用的法则被用于父域，然后利用递归应用于子域。例如，将网格分割成 4 部分，求解器将整个区域(父域)对分为两个子域，然后对每个子域进行相同的分割，总共分割为 4 部分。若将网格分割成 3 部分，求解器先将父域分成两个部分——一个大概是另一个的两倍大，然后将较大子域两分，这样总共就分为 3 部分。

（2）优化　优化可以提高网格分割的质量。垂直于最长主轴方向的两分法并不是生成最小接触边界的最好方法，pre-testing 操作可用于在分割之前自动选择最好的方向。

（3）光滑　通过分割间交换单元的方式使分割接触面数最小。此格式贯穿分割边界，如果接触边界面消失就传到相邻分割，如图 12-4 所示。



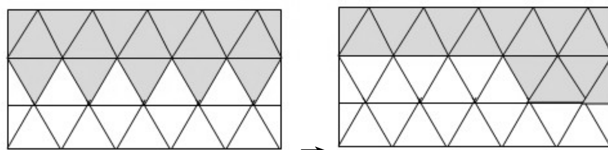


图 12−4　光滑优化

（4）合并　从每个分割中消除孤串，如图 12−5 所示。一个孤串就是一组单元，组里的每个单元至少都有一个面是接触边界。孤串会降低网格质量，导致大量传输损失。

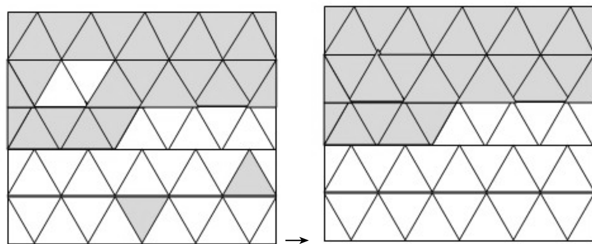


图 12−5　合并优化

4．检查分割

自动或手动分割完成后需要显示报告。在并行求解器中，在 Partition Grid 对话框中单击 Print Active Partitions 或 Print Stored Partitions 按钮，在连续求解器中单击 Print Partitions 按钮。

在并行时，FLUENT 软件是区分活动单元分割和存储单元分割这两种单元分割格式的。初始两者都被设为读入 case 文件建立的单元分割。如果用 Partition Grid 对话框重新分割网格，新的分割就是存储单元分割。要使其成为活动分割，应在 Partition Grid 对话框中单击 Use Stored Partitions 按钮。活动单元分割被用于当前计算中，而存储单元分割用于保存一个 case 文件。这种区别可让人们在某一台机器或网络上分割一个 case 文件，而在另一台机器上求解它。基于这两种格式的区别，在不同的并行机上，可以用一定数量的计算节点将网格划分为任意不同个数的分割，然后保存 case 文件，再将它加载到指定机器上。

分割网格后，要查看分割信息，并从图形上检查分割。自动或手动分割完成后需要显示报告。在并行求解器的 Partition Grid 对话框中单击 Print Active Partitions 或 Print Stored Partitions 按钮，在连续求解器中单击 Print Partitions 按钮。要进一步获得分割信息，选择 Display Contours...，可以绘出网格分割的等值图；要显示活动单元分割或存储单元分割，选择 Contours of 下拉列表框中的 Cell Info...，然后选择 Active Cell Partition 或 Stored Cell Partition，并关闭 Node Values 的显示。

5．负载分布

如果用于并行计算的处理器的速度明显不同，则可以在菜单栏中单击 parallel partition set load-distribution 命令，为分割设置一个负载分布。



12.4 检测并提高并行性能

想了解并行计算的性能到底怎样，可通过执行观测窗口来观测计算时间、信息传输时间和并行效率。为了优化并行机，可利用 FLUENT 软件自带的负载平衡来控制计算节点间的信息量。

1．检测并行性能

执行观测窗口可报告所剩计算时间以及信息传输的统计表。执行观测窗口总是被激活的，也可在计算完成后通过打印来获取统计表。要观看当前的统计表，可在菜单栏中单击 Parallel→Timer→Usage 命令。在菜单栏中单击 Parallel→Timer→Reset 命令，清除执行表可以在将来的报告中删除过去的统计信息。

2．优化并行求解器

（1）增加报告间隔　在 FLUENT 软件中，通过增加残差（单击 printing→plotting 命令）或其他求解追踪报告的间隔减少信息传输，提高并行性能。单击 Solve Iterate...命令，在弹出的 Iterate 对话框中修改 Reporting Interval 的值即可。

（2）负载平衡　FLUENT 软件中有动态负载平衡的功能。用并行程序的主要原因是为减少模拟的变化时间，理想情况下它是和计算源的总速度成比例的。

使用负载平衡的操作步骤如下：

1）选择 Load Balancing 选项。

2）在 Partition Method 下拉列表框中选择对分(Bisection)方法产生新的网格分割。作为自动负载平衡程序的一部分，可用特定的方法将网格重新细分。这样的分割被分配在计算节点之间以获得平衡的负载。

3）设置所需的 Balance Interval。如果其值为 0，FLUENT 软件会自动取一个最佳值，初始是用 25 次迭代的间隔，取一个非零值就可以限制其行为。然后 FLUENT 软件会在每 N 步之后进行一次负载平衡，N 就是设置的 Balance Interval。要选择一个足够大的间隔以平衡负载。

第 13 章　FLUENT 6.3 综合应用实例

要想有效地利用 FLUENT 6.3，就需要在大量实践的基础上积累经验，了解 FLUENT 6.3 在不同领域的应用可能性及效果性。

本章通过几个简单的实例，帮助读者认识 FLUENT 6.3 的操作界面，了解 FLUENT 6.3 的基本求解过程，为以后利用 FLUENT 6.3 解决实际工程问题打下基础。

13.1　二维三通管内流体的流动分析

1．实例概述

在日常输水、输气、输油管路中，人们经常会见到有分支或者交叉的管道，三通管就是最为常见的一种。图 13−1 就是一个水平放置的三通管，干管为 200mm 的钢管，管段中间接入直径 100mm 的直管，管中通水，水流方向从左到右，流速 2m/s。支管中水流速度为 1m/s。需要解决的问题是支管水流汇入后对干管水流产生多大的影响，交汇后在下游的流动情况如何？用 FLUENT 6.3 进行管内流动模拟，具体步骤如下。

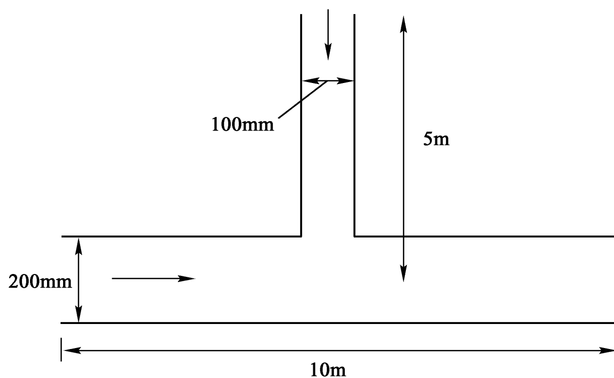


图 13−1　二维三通管几何模型简图

2．模型的建立

01 用 GAMBIT 来建立模型，双击其桌面快捷方式，弹出 GAMBIT 启动（Gambit Starup）对话框，如图 13−2 所示。默认的工作目录是 C:\Documents and Settings\Administrator，也可以通过 Browse 按钮选择工作目录。例如，D:\gambit working，以方便计



算结果的存放和查看，单击 Run 按钮，即启动了 GAMBIT。

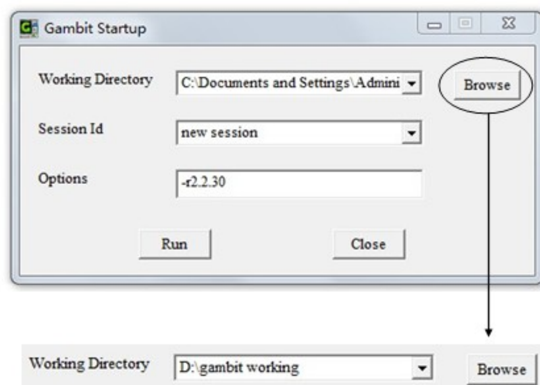


图 13-2 Gambit Starup 对话框

02 单击 Geometry →Vertex →Create Real Vertex ，在 Create Real Vertex 面板的 *x*、*y*、*z* 坐标文本框中输入（0，0.1，0），单击 Apply 按钮生成第一个坐标点，然后按照相同的方法依次建立点（0，−0.1，0）、点（10，−0.1，0）、点（10，0.1，0）、点（4.95，0.1，0）、点（4.95，5，0）、点（5.05，5，0）、点（5.05，0.1，0）、点（5.05，−0.1，0）和点（4.95，−0.1，0），共 10 个点。这样就完成了对该几何模型基础点的绘制，如图 13-3 所示。

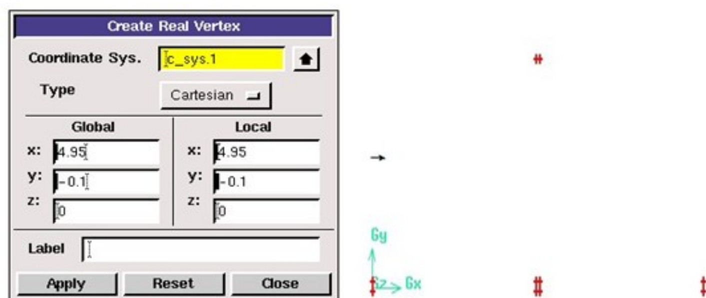


图 13-3 几何模型基础点的绘制

03 单击 Geometry →Edge →Create Straight Edge ，在 Create Straight Edge 面板中选择点 1（Vertix.1）与点 2（Vertix.1），建立这两点间的线段，然后依次建立点 2 与点 10，点 9 与点 10，点 3 与点 9，点 1 与点 5，点 5 与点 10，点 8 与点 9，点 5 与点 8，点 4 与点 8，点 3 与点 4，点 5 与点 6 ，点 6 与点 7，点 7 与点 8 之间的线段，共 13 条，如图 13-4 所示。

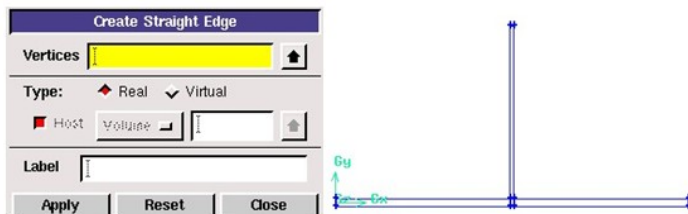


图 13-4 几何模型线段的绘制

04 单击 Geometry →Face →Create Face From Wireframe ，在 Create Face From Wireframe 面板的 Edges 黄色文本框中选取所需要围成面的线段，单击 Apply 按钮生成几何平面。本例中一共生成 4 个平面，分别由线段 1（edge.1）、线段 2、线段 5、线段 6 围成平面 1；线段 3、线段 6、线段 7、线段 8 围成平面 2；线段 4、线段 7、线段 9、线段 10 围成平面 3；线段 8、线段 11、线段 12、线段 13 围成平面 4，如图 13-5 所示。

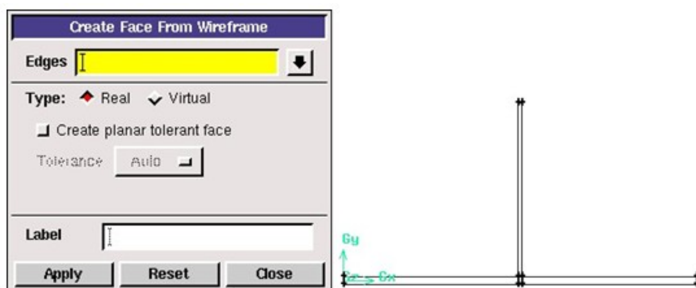


图 13-5 几何模型平面的绘制

至此已经完成了对几何模型的基本建立。

3．网格的划分

考虑到水流近壁面的粘性效应，首先需要绘制边界层网络。具体操作步骤如下。

01 单击 Mesh →Boundary Layer →Create Boundary Layer ，弹出 Create Boundary Layer 面板，在 Edges 黄色文本框中选取线段 2，视图中该线会出现一个红色的箭头，代表着边界层生成的方向。然后选取 1:1 的边界层生成方式，并设置第一个点距壁面距离为 0.001m，递增比例因子为 1.2，边界层为 4 层。最后，单击 Apply 按钮完成对边界层网格的绘制。按照同样的方式生成线段 3、线段 4、线段 5、线段 8、线段 9 的边界网格，如图 13-6 所示。

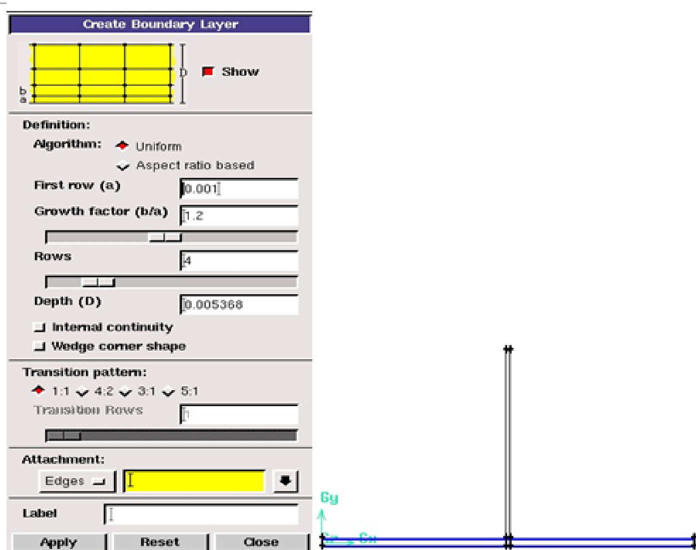


图 13-6 线段边界网格



02 单击 Mesh→Edge→Mesh Edges，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色文本框中选中线段 2、线段 4、线段 5、线段 9、线段 11、线段 13 共 6 根线段，选择 Interval Size 分段方式，并在左侧文本栏中输入 0.1。按照相同的方法，将线段 1、线段 3、线段 8、线段 10、线段 12 共 5 条线段以 Interval Size 为 0.01 划分，划分出来的线段边界网格如图 13-7 所示。

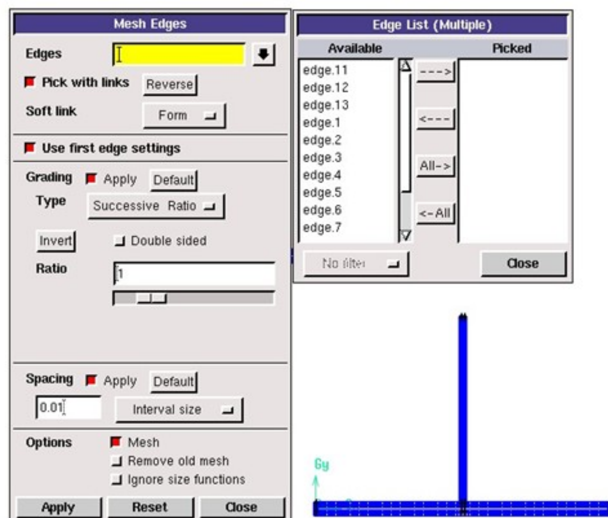


图 13-7　线段边界网格的划分

03 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成网格划分的面 1、面 2、面 3 和面 4，运用 Quad 单元与 Map 方法对这 4 个面进行划分，网格生成情况如图 13-8 所示。由于遵循由线到面的网格生成顺序，所以 Mesh Faces 对话框中 Interval Size 左侧文本框中的默认值 1 不需要更改，直接单击 Apply 按钮即可。

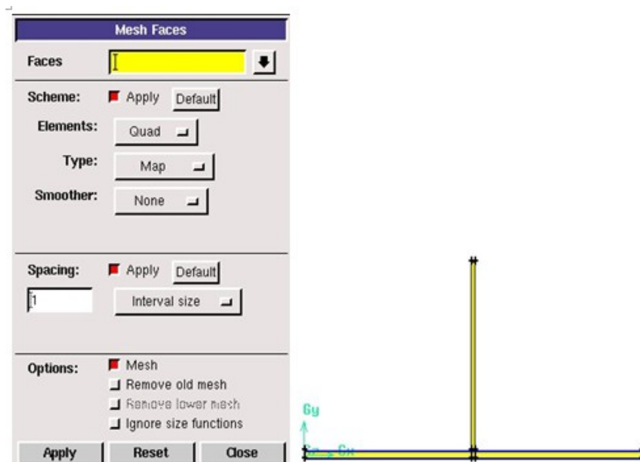


图 13-8　面边界网格的划分

04 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中将线段 1 和线段 12 定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in1 和 in2；将线段 10 定义为

自由出口（OUTFLOW），名称为 out，如图 13-9 所示。

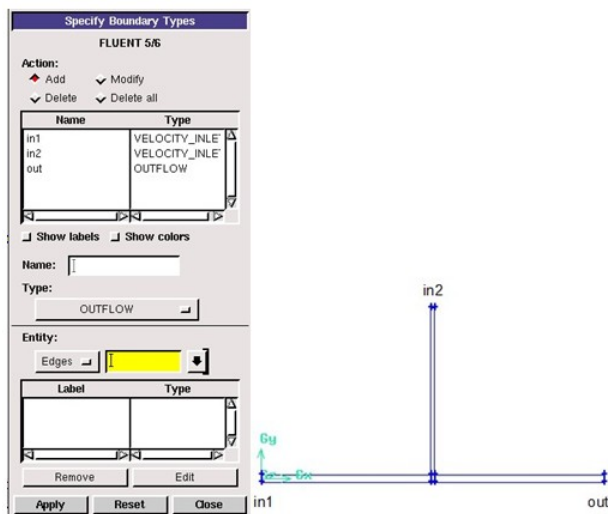


图 13-9　边界网格的定义

边界类型定义完后，需要将网格文件输出。

05 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 MODEL1.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。注意，一定要保证 Slover 为 FLUENT5/6，才能够正常输出 msh 文件。

4．求解计算

01 双击 FLUENT 6.3 图标，弹出 FLUENT Version 对话框，选择 2d（二维单精度）计算器，单击 Run 按钮启动 FLUENT 6.3。

02 执行 File→Read→Case...命令，读入划分好的网格文件 Model1.msh，如图 13-10 所示。

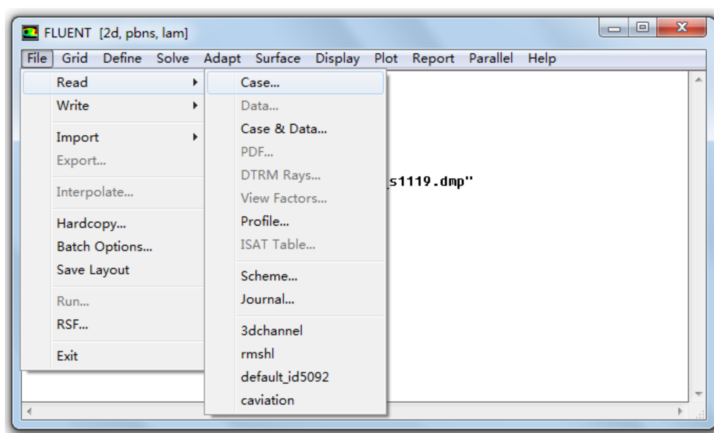


图 13-10　读入网格文件

读入网格文件之后，FLUENT 6.3 控制台窗口会自动显示网格文件的基本属性，包括节



点数、面数、单元数等信息，如图 13-11 所示。网格读入后，需要进行检查，执行 Grid→Check 命令，控制台窗口即显示网格的质量信息，包括尺寸范围、最小网格体积、最大网格体积、最小网格面积、最大网格面积等信息，如图 13-12 所示。若检测成功，最后一行会出现 Done 语句；若检测不成功，则需要检查问题所在，修改完善网格。

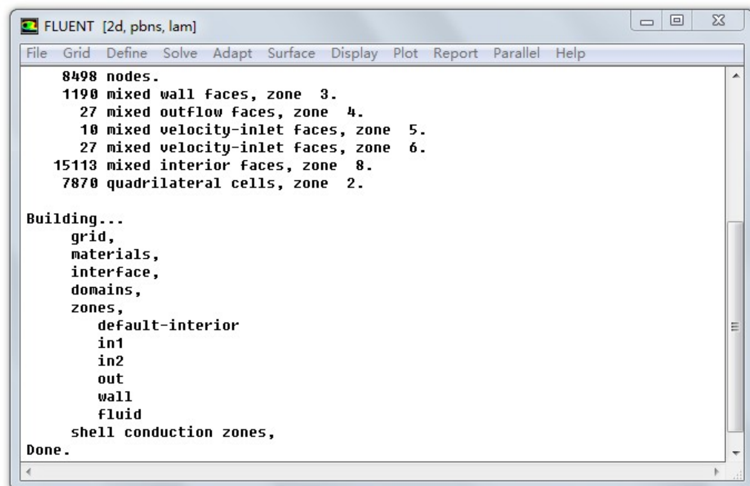


图 13-11　网格读入后控制台窗口信息

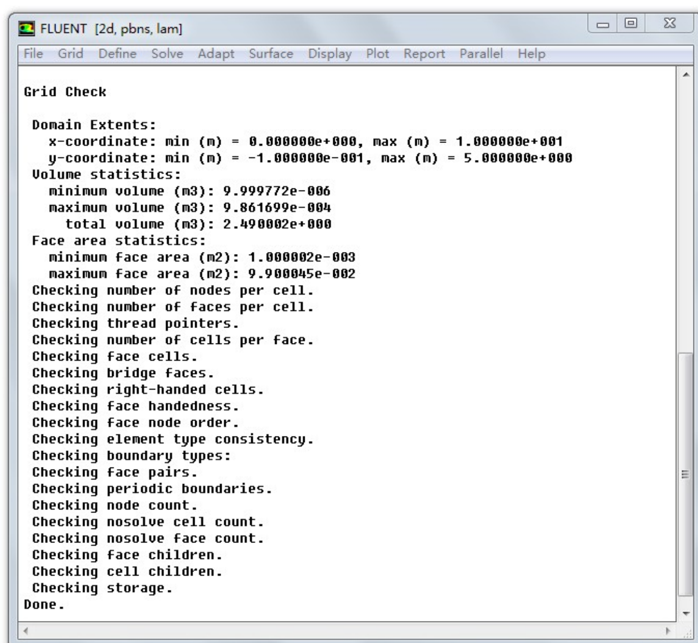


图 13-12　网格检查信息

03 执行 Grid→Scale...命令，弹出 Scale Grid 对话框，如图 13-13 所示。在该对话框中，用户可以重新定义网格的尺寸（GAMBIT 中默认单位是 m），还可以查看网格文件的各

方向尺寸范围。

求解前最关键的一步是计算条件的定义，由 Define 菜单完成相关命令操作。

04 执行 Define→Models→Solver...命令，弹出 Solver 对话框，如图 13−14 所示。这里选择压力基（Pressure Based），隐式（Implicit），即默认值，直接单击 OK 按钮。

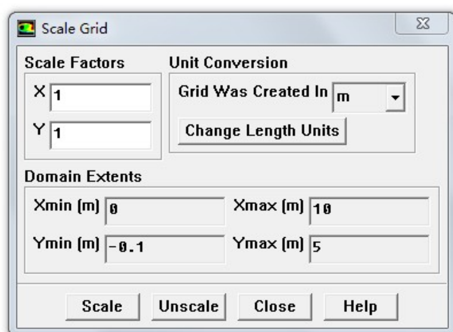


图 13−13　Scale Grid 对话框

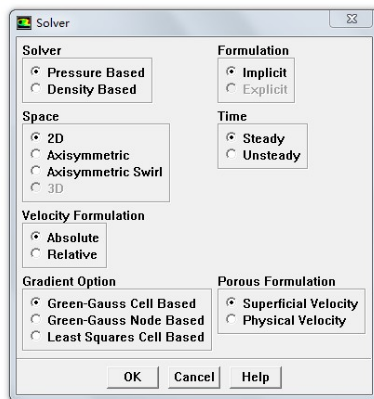


图 13−14　基本模型选择

05 本题中水流速度（1~2）m/s，管内为湍流流动，因此执行 Define→Models→Viscous...命令，在弹出的 Viscous Model 对话框中选择标准 k-epsilon[2 eqn](k~ε 模型)，如图 13−15 所示。对话框右侧的模型参数（Model Constants）中的数值不做变动，取为默认值，单击 OK 按钮。

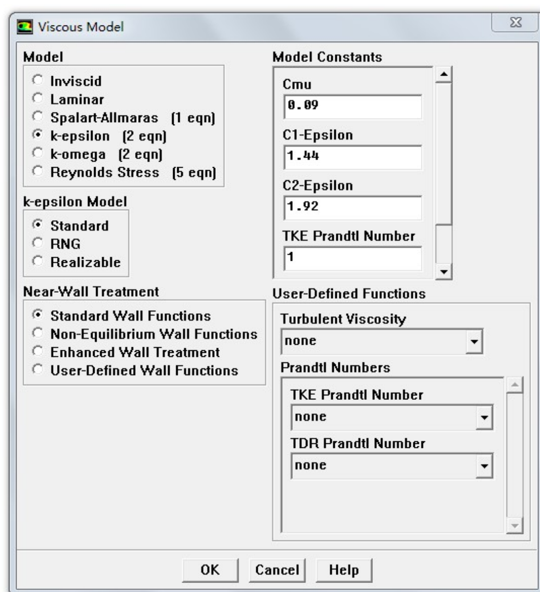


图 13−15　Viscous Model 对话框

06 执行 Define→Material 命令。在 Materials 对话框中定义流动的材料，如图 13−16



所示。本题中所需的材料为水，这就需要从 FLUENT 6.3 自带的材料数据库中调用，具体操作方法为：单击 Materials 对话框右侧的 Fluent Database…按钮，在弹出的 Fluent Database Materials 对话框中，选择列表中的材料——水，单击 water-liquid[h2o<1>]，即会在下方的 Properties 中出现相应的物理属性数据，如图 13-17 所示。单击 Copy 按钮，则将数据库中的材料复制到当前工程中。然后在 Materials 对话框中的 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中选择材料水。最后依次单击 Change/Create 按钮和 Close 按钮，完成材料的定义。

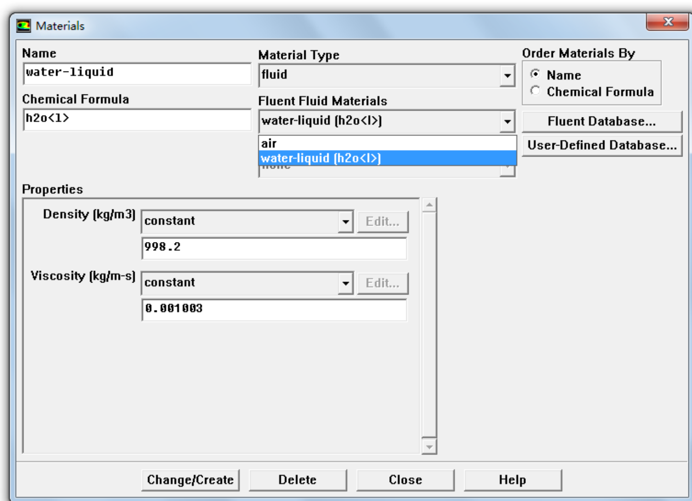


图 13-16　Materials 对话框

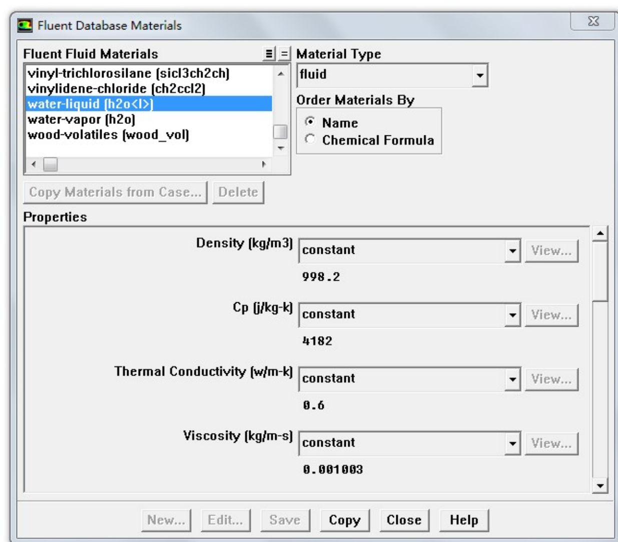


图 13-17　Fluent Database Materials 对话框

07 执行 Define→Operating Conditions 命令，弹出 Operating Conditions 对话框，如图 13-18 所示。其中，操作压强默认为一个大气压，操作压强的参考位置默认为原点（0，0），

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第13章 FLUENT 6.3 综合应用实例

本题中不需要考虑重力作用，故不对 Gravity 进行任何设置，单击 OK 按钮。

08 定义边界数据。执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，如图 13-19 所示。本题中需要定义的有 fluid、in1、in2 和 out 4 个边界条件。

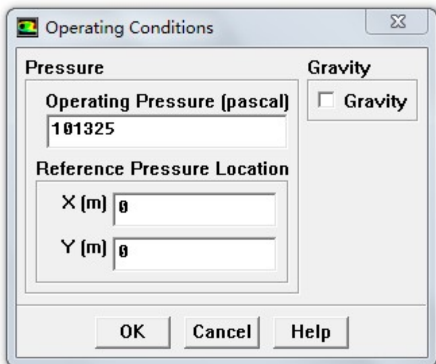


图 13-18 Operating Conditions 对话框

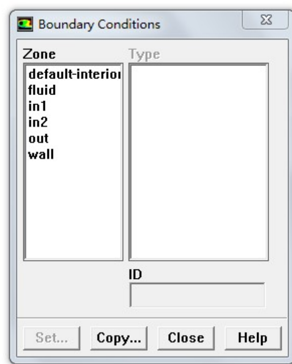


图 13-19 Boundary Conditions 对话框

❶选择 fluid，其类型 Type 为 fluid，单击 Set…按钮，在图 13-20 所示的 Fluid 对话框中 Material Name 的下拉列表框中选择 water-liquid，单击 OK 按钮。

❷选择 in1，其类型 Type 为 velocity-inlet，单击 Set…按钮，在图 13-2 所示的 Velocity Inlet 对话框的 Velocity Specification Method 下拉列表框中选择 Magnitude,Normal to Boundary，表示速度进口方向垂直于入口边界；在 Velocity Magnitude(m/s)文本框中输入 2，表示进口速度为 2m/s。在 Turbulence 选项组中可以进行湍流参数的设置，本例中选择 Specification Method 下拉列表框中的 Intensity and Hydraulic Diameter；在 Turbulence Intensity 文本框中输入 1，Hydraulic Diameter 文本框中输入 0.1；最后单击 OK 按钮完成对 in1 的设置。

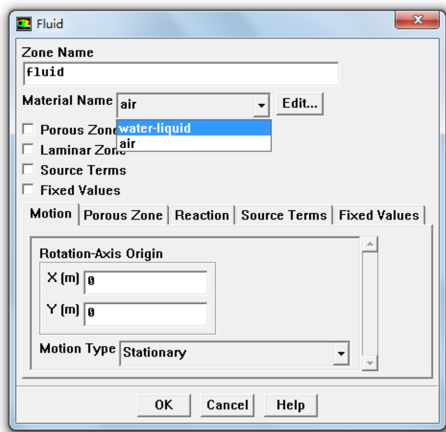


图 13-20 Fluid 对话框

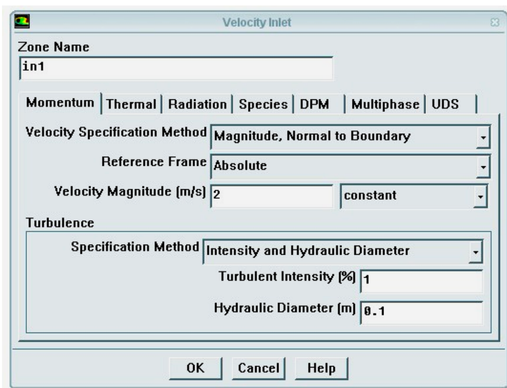


图 13-21 Velocity Inlet 对话框

❸in2 的设置同 in1，区别仅在于 Velocity Magnitude(m/s)中输入 1 和 Hydraulic Diameter 中输入 0.05。

❹选择 out，其类型 Type 为 outflow，单击 Set...按钮，在图 13-22 所示的 Outflow 对话框的 Flow Rate Weighting 文本框中输入 1，表示进入的水均从该出口流出。

09 执行 Solve→Control→Solution...命令，弹出 Solution Controls 对话框，如图 13-23 所示。选择默认值即可。



图 13-22　Outflow 对话框

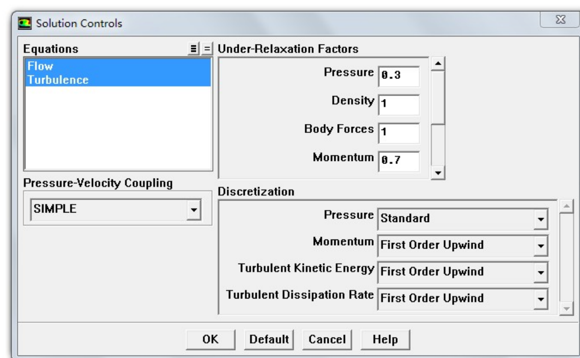


图 13-23　Solution Controls 对话框

10 对流场进行初始化。执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在弹出的 Solution Initialization 对话框的 Compute From 下拉列表框中选择 all-zones，对全区域进行初始化，如图 13-24 所示。然后顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

11 初始化完成后，执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在弹出的 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，以打开残差曲线图，如图 13-25 所示。在对话框下方的 Criteria 中可以输入各参数的收敛精度要求，FLUENT 默认值为 0.001。

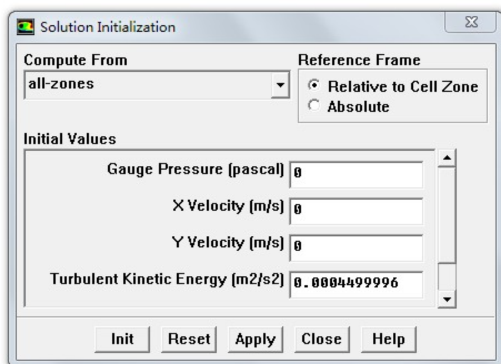


图 13-24　Solution Initialization 对话框

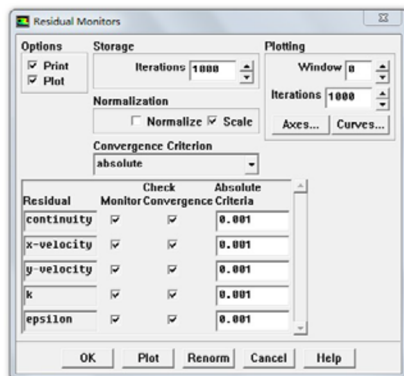


图 13-25　Residual Monitors 对话框

12 定义迭代参数。执行 Solve→Iterate...命令，在弹出的 Iterate 对话框中设置 Number of Iterations 为 1000，单击 Iterate 按钮即可开始求解，如图 13-26 所示。

在求解过程中，控制台窗口会实时显示计算的基本信息，包括 x 与 y 方向的速度、k 和

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例



g 的收敛情况。本例在 97 步达到收敛，此时窗口出现“solution is converged”的提示语句，如图 13-27 所示。其残差曲线如图 13-28 所示。

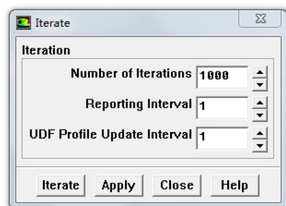


图 13-26　Iterate 对话框

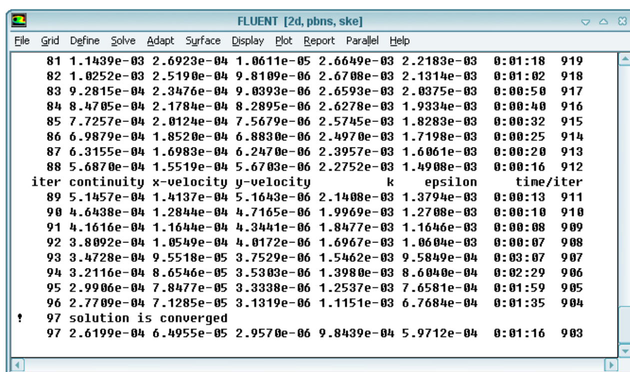


图 13-27　“solution is converged”的提示语句

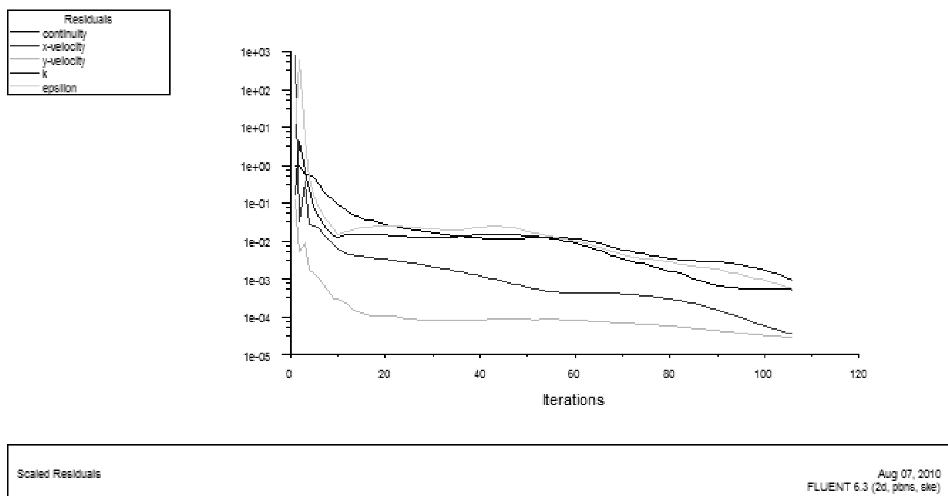


图 13-28　残差曲线

计算完毕后，可以通过 Display 菜单进行图形结果显示。执行 Display→Contours…命令，弹出 Contours 对话框，如图 13-29 所示。Options 选项组中 Filled 未选中，则显示的为等值线图，如图 13-30 所示的压强等值线图。若 Filled 选中，则显示为云图，如图 13-31 所示的速度云图。Contours of 下拉列表框中可以选择显示各种物理参数的等值线图或云图，如图 13-32 所示。

13 执行 Display→Vectors…命令，弹出如图 13-33 所示的 Vectors 对话框，其界面与 Contours 对话框相似。本例设置 Scale 为 2，单击 Display 按钮，显示如图 13-34 所示的速度矢量图。

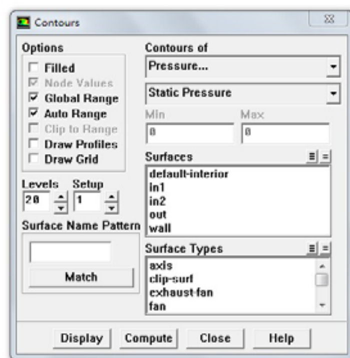


图 13-29　Contours 对话框



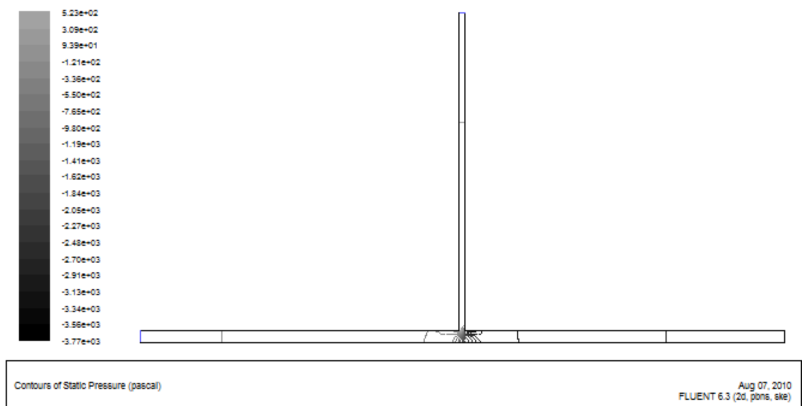
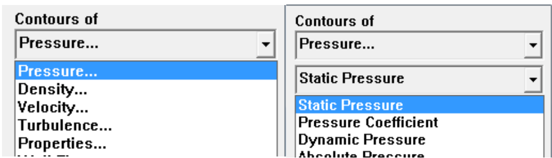


图 13-30　压强等值线图



图 13-31　速度云图



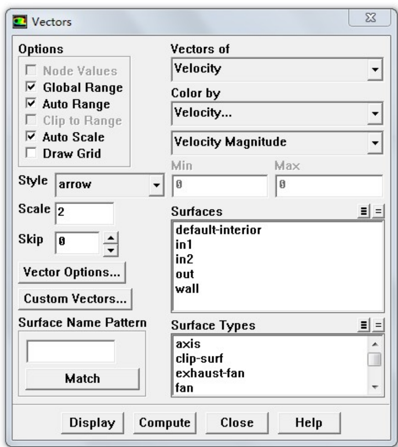


图 13-32　Contours of 下拉列表框

图 13-33　Vectors 对话框

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

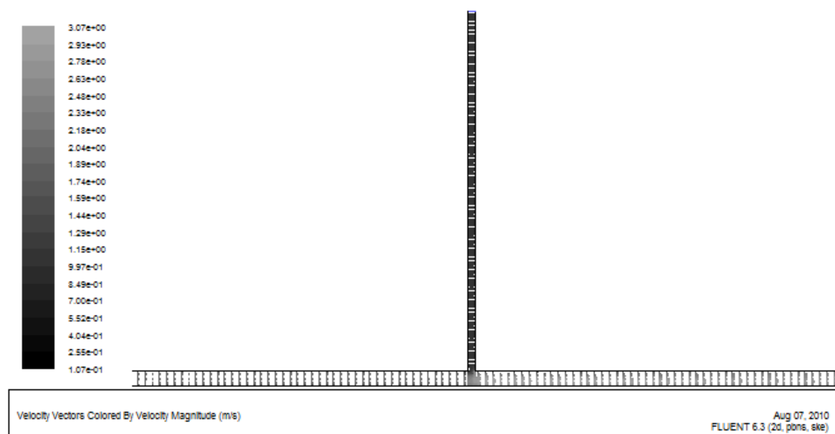


图 13-34　速度矢量图

14 除了按需要选择要显示的图形之外，还可以进行计算报告的显示。执行Report→Fluxes…命令，弹出Fluxe Report对话框，如图 13-35 所示。选择进口、出口边界，单击Compute按钮，完成进口、出口质量流量的计算，结果见Results。可见进口、出口质量流量相差 7.629395×10^{-6}，满足了精度要求。

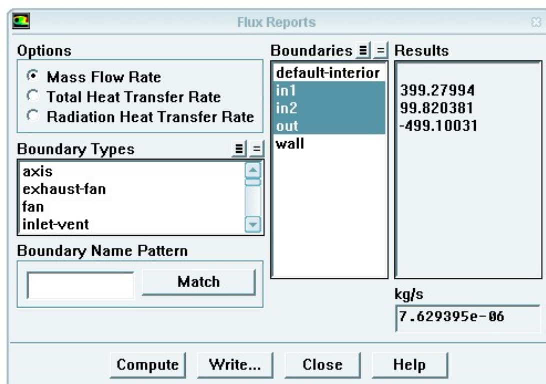


图 13-35　Fluxe Report 对话框

15 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model1.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model1.dat。

16 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

13.2　二维自然对流换热问题的分析

1．实例概述

已知大小两个圆环的直径分别为 100mm 和 40mm，壁面均为恒温，温度分别为 340℃和 370℃，偏心距为 20mm，如图 13-36 所示。现假定要用四边形网格单元，采用结构网格来



模拟圆环内气体的流动及换热情况。

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 Geometry →Face ，用鼠标右键单击 Create Real Rectangular Faces ，从弹出的级联按钮中单击 Circle，弹出 Create Real Circular Face 面板，如图 13-37 所示。在 Radius 文本框中输入 20（代表小圆半径），在 Label 文本框中输入 Small（小圆代号），单击 Apply 按钮，在窗口显示区出现小圆，如图 13-37 所示。

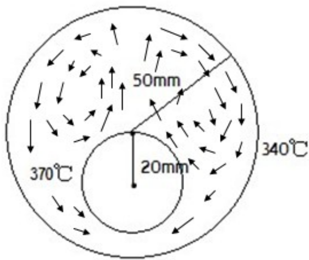


图 13-36　实例图

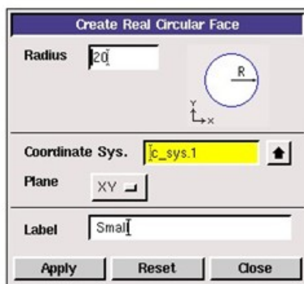


图 13-37　Create Real Circular Face 面板及小圆面

03 同理，生成大圆面，Radius 为 50，Label 为 big。然后从刚才弹出的级联按钮中单击 Rectangle，在弹出的对话框的 Wide 和 Height 文本框中分别输入 55 和 110，在 Label 文本框中输入 rect，生成矩形，如图 13-38 所示。

04 单击 Geometry →Face →Move/Copy Faces ，出现 Move/Copy Faces 面板，如图 13-39 所示。单击 Faces Pick 微调框右侧的上箭头按钮，从弹出的列表中单击 small，回到 Move/Copy Faces 面板后，选中 Move 复选框和 Translate 复选框，本例中为默认值。在表示移动距离的 Global 和 Local 两组坐标中，对于 *y* 坐标均输入-20。单击 Apply 按钮后，小圆面即下移 20mm，如图 13-40 所示。按同样的办法向右移动矩形面 27.5mm，结果如图 13-41 所示。

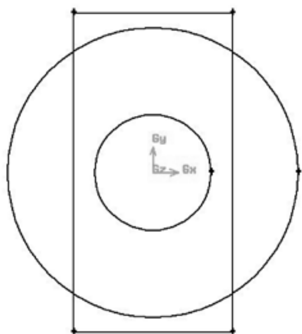


图 13-38　两个圆面和一个矩形面

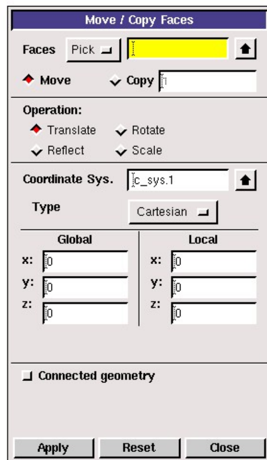


图 13-39　Move/Copy Faces 面板



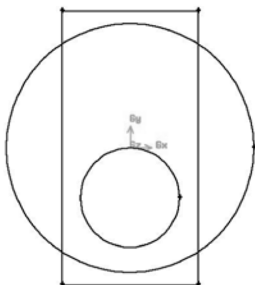


图 13-40　移动小圆面后显示图

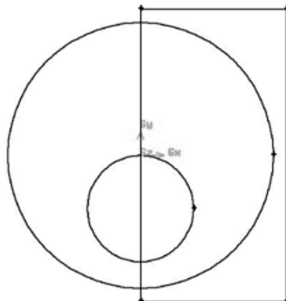
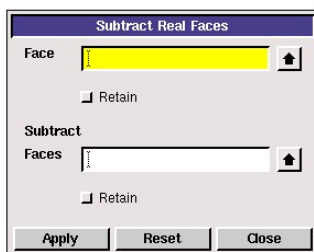


图 13-41　移动矩形面后显示图

05 用鼠标右键单击 Face 命令组的 Subtract Faces，在弹出的级联按钮中单击 Subtract，弹出 Subtract Real Faces 面板，如图 13-42 所示。从 Face 列表框中选择大圆面的代号 big，从 Subtract Faces 列表框中选择 small 及 rect。单击 Apply 按钮，得到结果如图 13-42 所示。



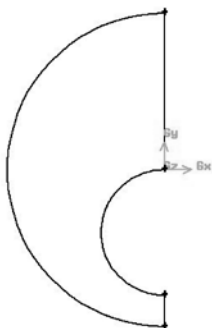
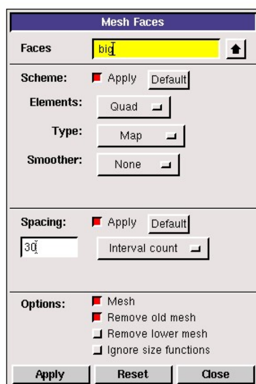


图 13-42　Subtract Real Faces 面板及模型图

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，如图 13-43 所示。在 Faces 选项中选择所要划分的圆面 big，选择 Quad（四边形）单元，Map 类型的网格（即结构网络），Interval Count 方式，给定间隔数量为 30，也就是说 2D 区域的每条边上都有 31 个点来分隔。在 Options 选项中，选择 Mesh、Remove old mesh、Remove lower mesh 复选框，单击 Apply 按钮，出现网格图示，如图 13-43 所示。



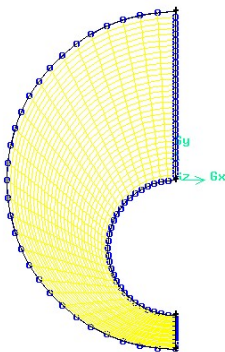


图 13-43　Mesh Faces 面板及网格



02 单击 Zones→Specify Boundary Types，弹出 Specify Boundary Types 面板，如图 13-44 所示。选中 Add，单击 Entity 选项的 Edges 按钮右侧的下箭头，弹出边界列表，选中表示小圆弧的 edge 9（可按下〈Shift〉键并单击小圆弧来选择），单击 Type 下的按钮，在弹出的列表中选中 WALL，将小圆弧指定为壁面边界。然后在 Name 中输入代表这个壁面的名称，如“wall_in”。单击 Apply 按钮。同理将大圆弧指定为 wall_out，其他两段对称线的 Type 选择为 symmetry。

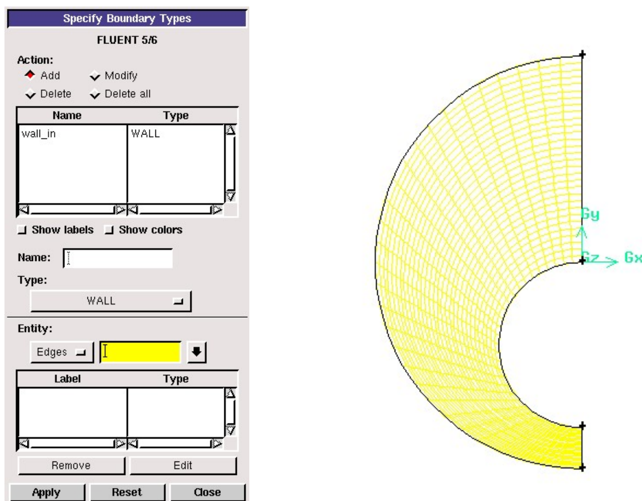


图 13-44　Specify Boundary Types 面板及边界

03 边界类型定义完后，需要将网格文件输出。执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model2.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。



注意

一定要保证 Slover 为 FLUENT5/6，才能够正常输出 msh 文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 2d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 MODEL2.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。检测成功后，执行 Grid→Scale…命令，弹出 Scale Grid 对话框，重新定义网格尺寸（GMBIT 中默认单位为 m），将 *x* 和 *y* 方向的比例尺均设定为 0.001，单击 Scale 按钮。

03 执行 Define→Models→Solver…命令，采用默认的求解器设置，即选择压力基隐式，定常模型，采用绝对速度公式，单击 OK 按钮。

04 执行 Define→Models→Viscous…命令，在对话框中选择 Laminar（层流模型），单击 OK 按钮。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

05 执行 Define→Models→Energy，弹出 Energy 对话框，如图 13-45 所示，启动能量方程，单击 OK 按钮。

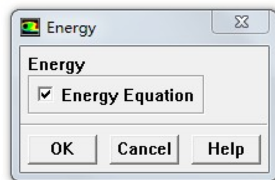


图 13-45　Energy 对话框

06 执行 Define→Materials 命令，修改当前材料列表中 air 属性，将其密度常数改为 incompressible-ideal-gas（不可压理想气体），其他属性不变，如图 13-46 所示。单击 Change/Create 按钮，完成对材料的定义。

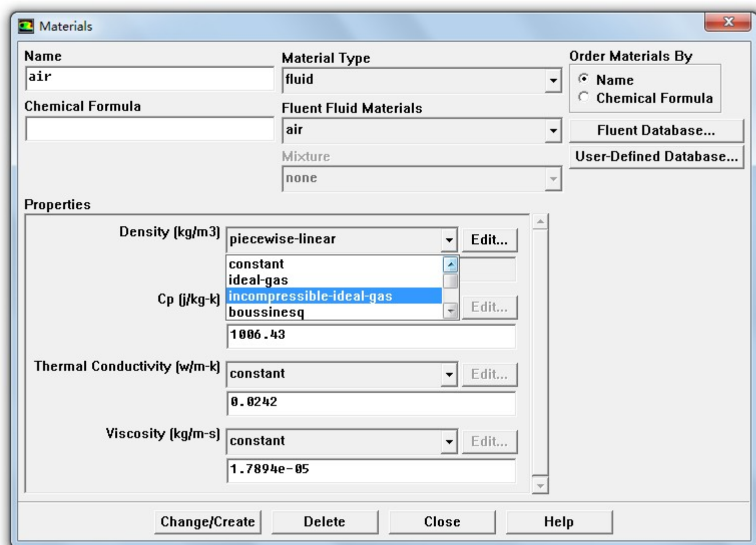


图 13-46　Materials 对话框

07 执行 Define→Operating Conditions…命令，弹出 Operating Conditions 对话框，如图 13-47 所示。选择 Gravity，重力加速度填写-9.81。

08 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，如图 13-48 所示。

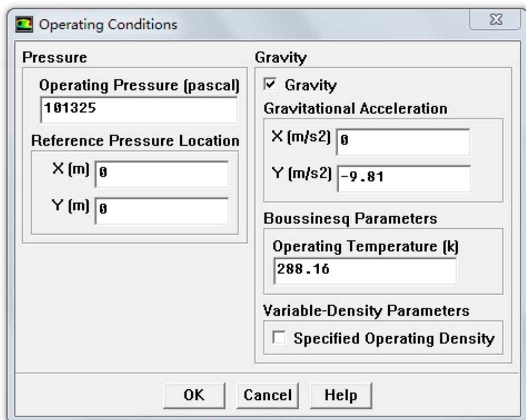


图 13-47　Operating Conditions 对话框

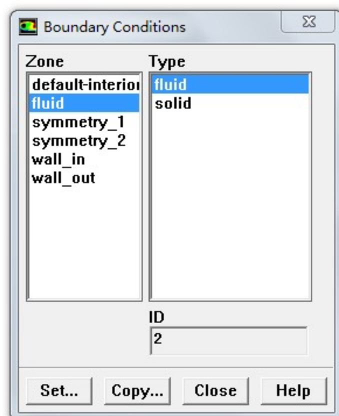


图 13-48　Boundary Conditions 对话框



❶在列表中选择 fluid，其类型（Type）为 fluid，单击 Set…按钮，选择 air，单击 OK 按钮。选择小圆弧边界 wall_in，Type 为 wall，单击 Set…按钮，选择 Thermal 标签下 Temperature，温度值设定为 643.15K（370℃），恒温壁面，Heat Generation Rate 为 0，如图 13-49 所示。单击 OK 按钮即可完成。

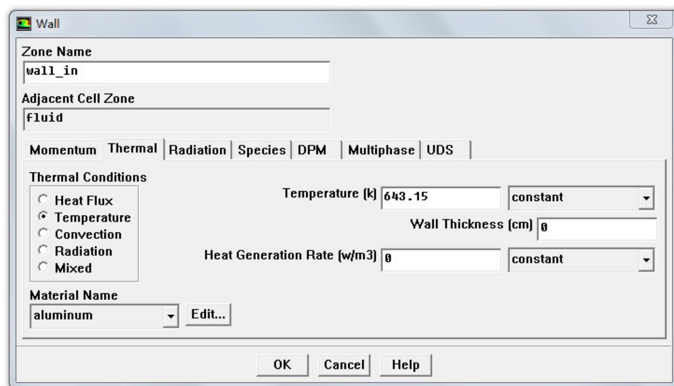


图 13-49　Wall 对话框

❷同理，选择 wall_out，设定大圆弧边界为恒温壁面，温度为 613.15K（340℃）。选择 symmetry_1，选择 Type 为 Symmetry，单击 Set…按钮，弹出 Symmetry 对话框，如图 13-50 所示。单击 OK 按钮即可完成。同理设置 symmetry_2。

09 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出 Solution Controls 对话框，采用默认值。

10 执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 all-zones，对全区域进行初始化，然后顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

11 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，其他变量保持默认值，如图 13-51 所示。

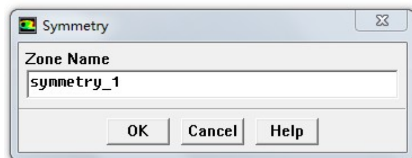


图 13-50　Symmetry 对话框

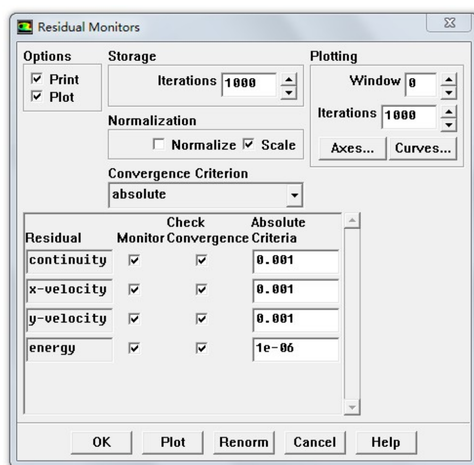


图 13-51　Residual　Monitors 对话框

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

12 执行 Solve→Iterate…命令，设置 Number of Iteration 为 200，单击 Iterate 按钮开始求解。79 步以后达到收敛，其残差曲线图如图 13-52 所示。

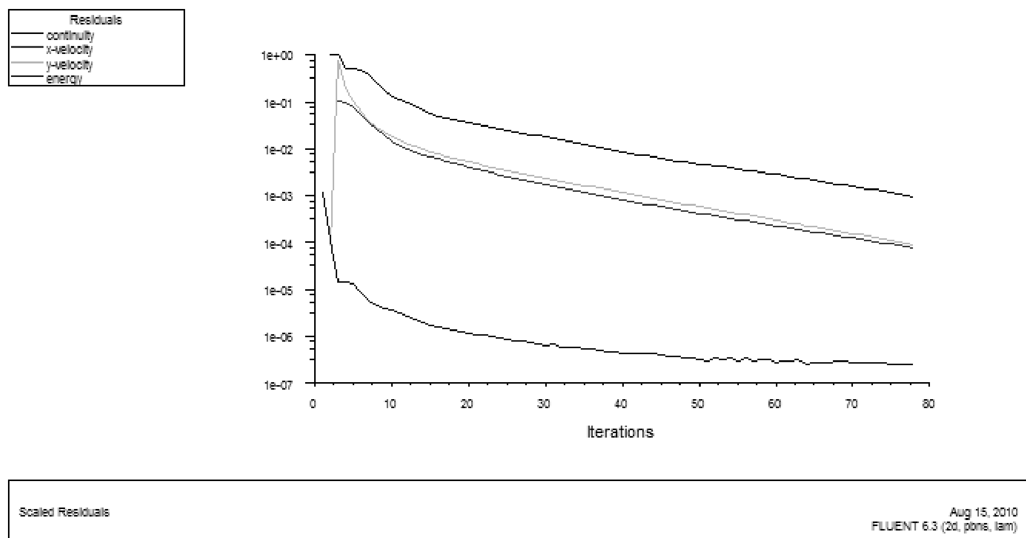


图 13-52　残差曲线图

13 执行 Display→Contours…命令，在 Contours of 下拉列表框中选择 Temperature，单击 Display 按钮，显示等温线图，如图 13-53 所示。选择 Pressure，显示静压等值图，如图 13-54 所示。选择 Pressure 以及下面选框中的 Total Pressure，则显示总压等值线图，如图 13-55 所示。选择 Filled，则显示云图，如图 13-56～图 13-58 所示。

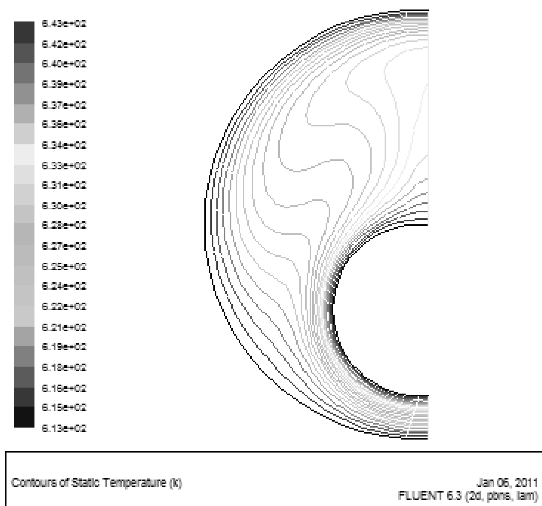


图 13-53　等温线图

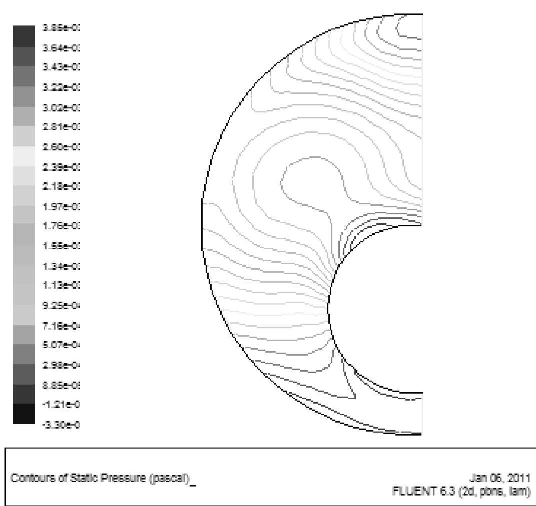


图 13-54　静压等值图



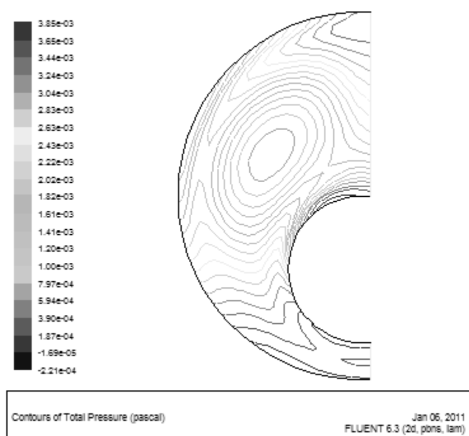


图 13-55　总压等值线图

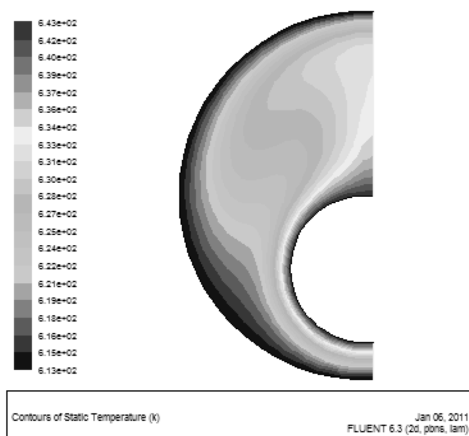


图 13-56　温度云图

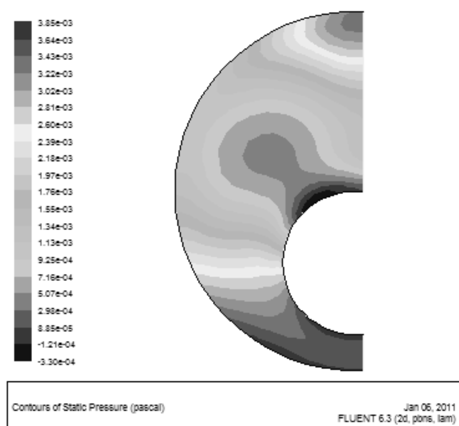


图 13-57　静压云图

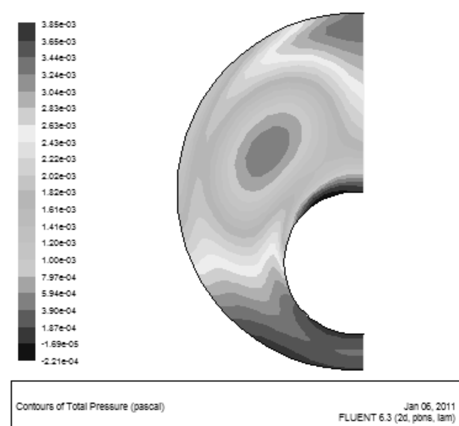


图 13-58　总压云图

14 执行 Display→Vectors…命令，设定 Scale 为 2，Skip 为 1，单击 Display 按钮，得到速度矢量图，如图 13-59 所示。

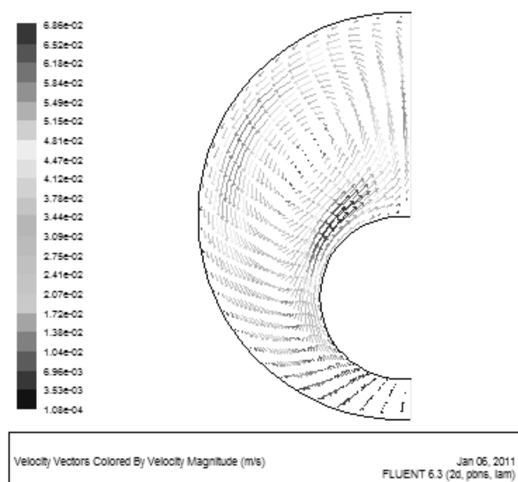


图 13-59　速度矢量图

15 执行 Report→Fluxes…命令，选择 wall_in 和 wall_out，选择 Total Heat Transfer Rate，单击 Compute 按钮，得到通过圆筒壁面的热量。通过小圆筒壁面的热量是 5.6375723w，正值表示小圆筒是热源，向计算区域散热；通过大圆筒壁面的是 –5.6319122w，负值表示大圆筒吸热，如图 13-60 所示。

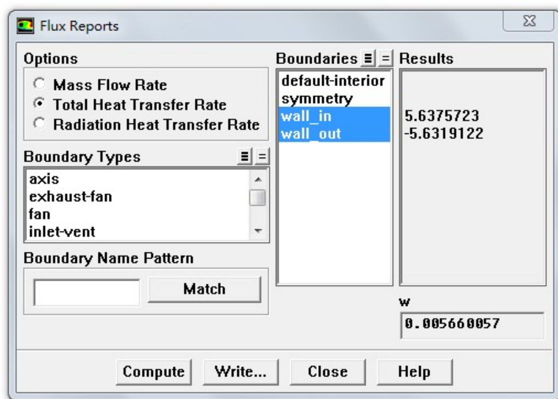


图 13-60 Flux Reports 对话框

16 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model2.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model2.dat。

17 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

13.3 喷嘴内气体流动分析

1．实例概述

假设流动空气高速通过一个缩放型喷嘴，其圆形横截面面积A随着轴向距离x的变化而变化，符合公式：$A = 0.1 + x^2$（$-0.5 < x < 0.5$）；A的单位是平方米，x的单位是米，如图 13-61 所示。进口处的滞点压力P_0为 101,325 Pa，滞点温度T_0为 300K。出口的静压力p为 3,738.9 Pa。用FLUENT 6.3 计算喷嘴内的马赫数、温度以及压力的分布，并将结果和准一维喷嘴流动进行比较。这种高速流动雷诺数很大，因此粘度影响需要被限制在接近壁面的一个较小区域里，故选择inviscid（无粘流）作为流动模型。

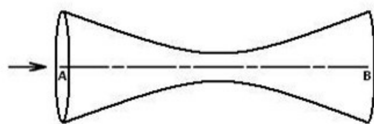


图 13-61 缩放型喷张

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击Geometry →Vertex →Create Real Vertex ，先创建两个顶点(−0.5，0，0)，(0.5，0，0)。接着创建线，单击 → → ，选择两个顶点vertex.1 和vertex.2，单击Apply按钮。接着创建图形边缘曲线，根据$A=\pi r^2$，其中$r(x)$是横截面的半径，且$A=0.1+x^2$，对于给定的几何模型，有$r(x) = [(0.1 + x^2)/ \pi]0.5$，$-0.5 < x < 0.5$。可直接创建一个包含曲线上坐标点的文件vert.dat，从而建立平滑的边缘曲线。单击File→Import→ICEM Input …，弹出



Import ICEM Input File对话框，如图 13−62 所示。选择vert文件的路径，单击Accept按钮，出现如图 13−62 所示的曲线。

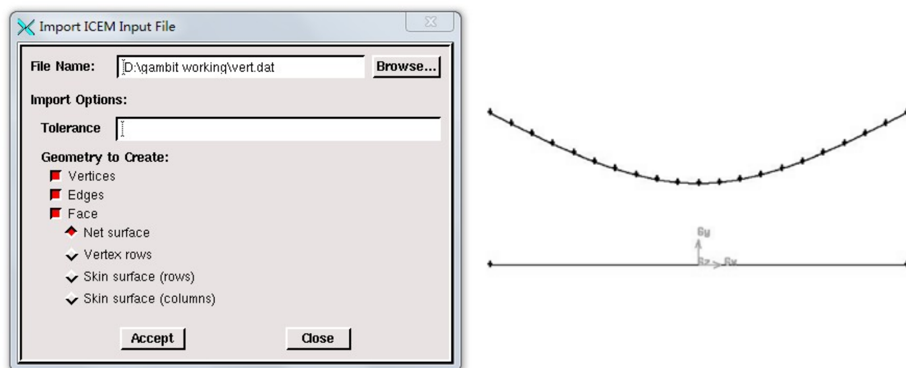


图 13−62　Import ICEM Input File 对话框及曲线

03 在 Create Straight Edge 面板中选择 vertex.1 和 vertex.3，单击 Apply 按钮；选择 vertex.2 和 vertex.3，单击 Apply 按钮，形成左右两条边缘线，作为进口和出口，如图 13−63 所示。

04 单击 Geometry →Face →Create Face From Wireframe ，选择图形各个边缘，单击 Apply 按钮，完成对面的建立。

3．网格的划分

01 单击 Mesh →Edge →Mesh Edges ，在 Mesh Edges 面板中选择左右两条边缘线，设置 Interval count 为 20，单击 Apply 按钮。选择上下两条边缘曲线，设置 Interval count 为 50，划分出来的网格如图 13−64 所示。

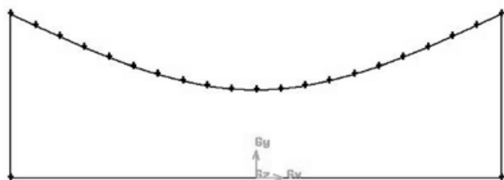


图 13−63　几何模型线的建立

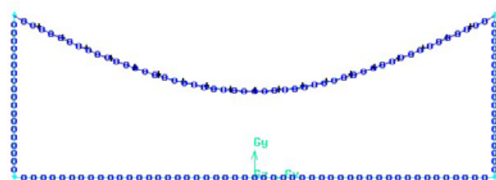


图 13−64　边缘线网格的划分

02 单击 Mesh →Face →Mesh Faces ，打开 Mesh Faces 面板，选中已经完成网格划分的面 1，运用 Quad 单元与 Map 方法对这个面进行划分，网格生成情况如图 13−65 所示，直接单击 Apply 按钮即可。

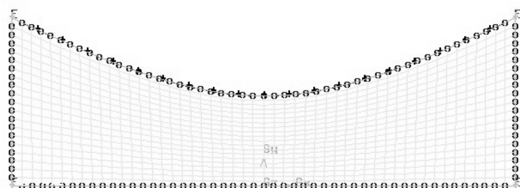


图 13−65　面网格的划分

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

03 单击 Zones →Specify Boundary Types ，在 Specify Boundary Types 面板中将左边的线段定义压力入口（PRESSURE_INLET），名称为 inlet；将右边的线段定义为压力出口（PRESSURE_OUT），名称为 outlet；上边缘曲线定义为 WALL，名称为 wall；下边缘曲线定义为 AXIS，名称为 centerline。

04 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model3.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 2ddp 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 Model3.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Define→Models→Solver…命令，选择密度基隐式，Space 选项选择 Axisymmetric 单选按钮，Time 选项选择稳态模型，采用绝对速度公式，单击 OK 按钮，如图 13-66 所示。

04 执行 Define→Models→Viscous…命令，在 Viscous Model 对话框中选择 Inviscid（无粘流模型），如图 13-67 所示。单击 OK 按钮完成。

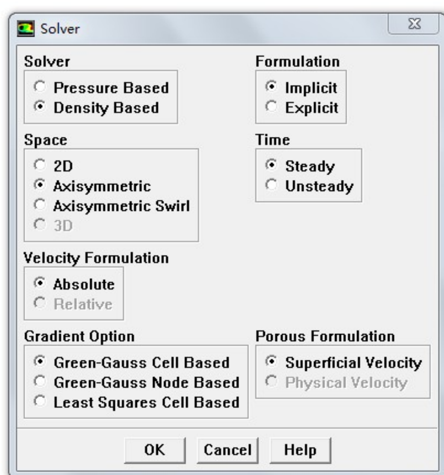


图 13-66 Solver 对话框

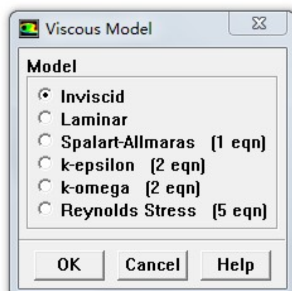


图 13-67 Viscous Model 对话框

05 因为是可压缩流动，所以执行 Define→Models→Energy，弹出 Energy 对话框，如图 13-68 所示。启动能量方程，单击 OK 按钮。

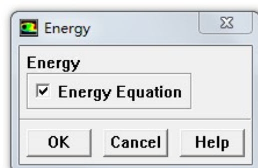


图 13-68 Energy 对话框

06 执行 Define→Materials 命令，修改当前材料列表中 air 属性，将其密度常数改为 ideal-gas，其他属性不变，单击 Change/Create 按钮，完成对材料的定义。

07 执行 Define→Operating Conditions…命令，弹出 Operating Conditions 对话框，在本例中因为只要绝对压力，故将压力改为 0，如图 13-69 所示。



08 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，如图 13-70 所示。

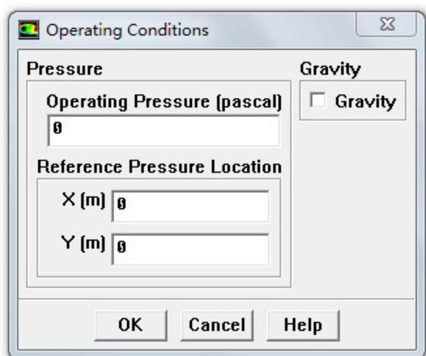


图 13-69 Operating Conditions 对话框

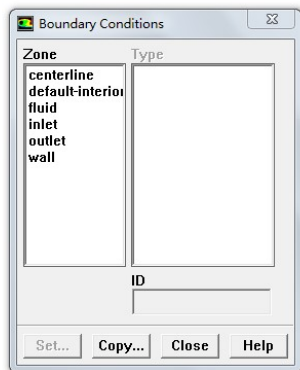


图 13-70 Boundary Conditions 对话框

❶在列表中选择 inlet，其类型（Type）为 pressure_inlet，单击 Set…按钮，按照图 13-71 所示输入总压 101325Pa，初始压力 99290.5Pa 和总温度 300K，单击 OK 按钮。

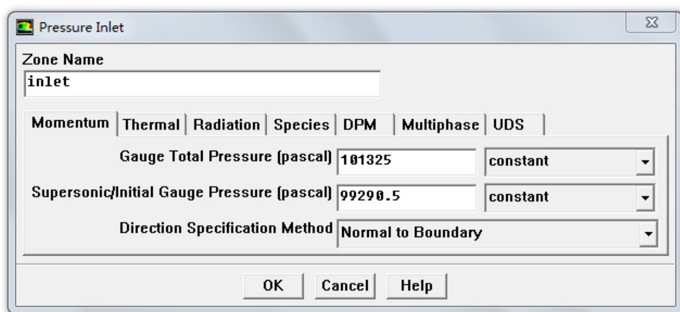


图 13-71 Pressure Inlet 对话框

❷同理，选择 outlet，选择 Type 为 Pressure_outlet，单击 Set…按钮，按照上述压力数值输入，单击 OK 按钮即可。

09 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出 Solution Controls 对话框，在 Discretization 选项下选择 Flow 类型为 Second Order Upwind，单击 OK 按钮。

10 执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 inlet，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

11 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，各变量收敛精度要求为 0.001，如图 13-72 所示。单击 OK 按钮完成。

12 执行 Solve→Iterate…命令，设置 Number of Iteration 为 100，单击 Iterate 按钮开始求解。89 步以后达到收敛，其残差曲线图如图 13-73 所示。

13 迭代完成后，执行 Display→Contours 命令，输出本例喷嘴处的压力、温度、马赫数云图，如图 13-74～图 13-76 所示。执行 Display→Vectors 命令，输出速度矢量图，如图 13-77 所示。

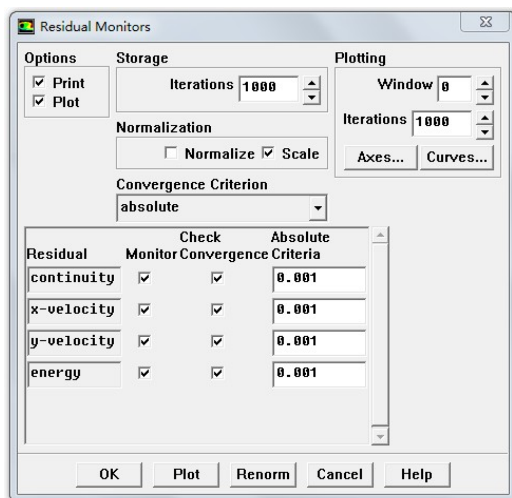


图 13-72　Residual Monitors 对话框

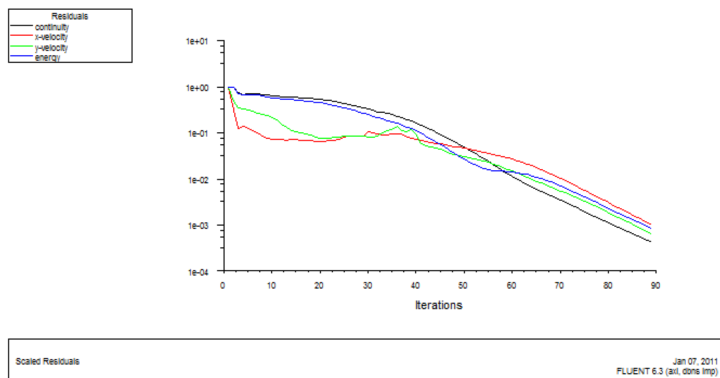


图 13-73　残差曲线图

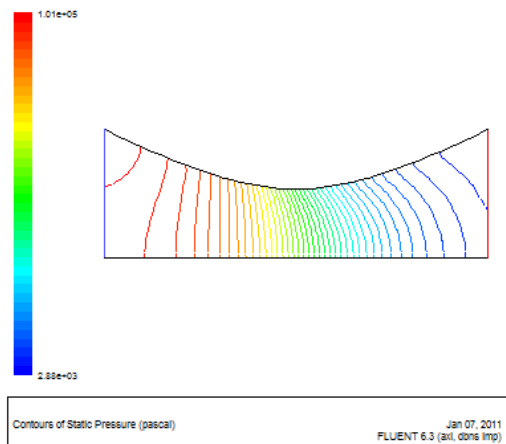


图 13-74　压力分布图

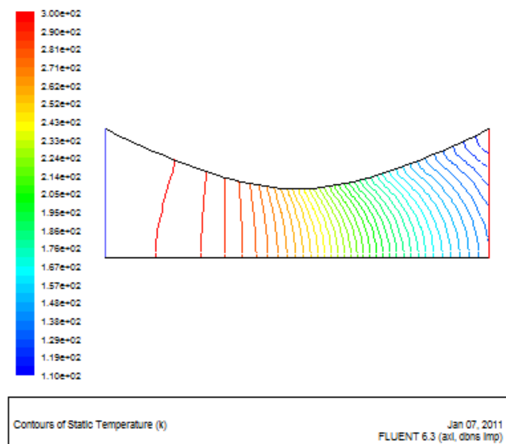


图 13-75　温度分布图



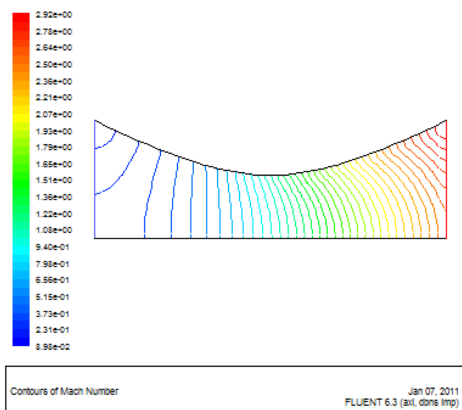


图 13-76　马赫数分布图

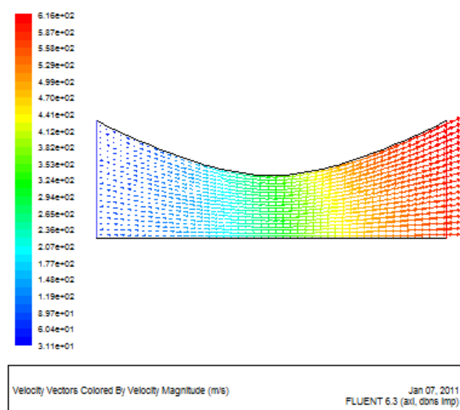


图 13-77　速度矢量图

14 执行 Plot→XY Plot…命令，在 Solution XY Plot 对话框中，Y Axis Function 选项下选择 Velocity 和 Mach Number，如图 13-78 所示。因为要绘制在 *x* 轴向和壁面的变化，所以需要在 Surfaces 选项下选择 centerline 和 wall，单击 Plot 按钮，出现在轴向和壁面上马赫数的变化，如图 13-79 所示。

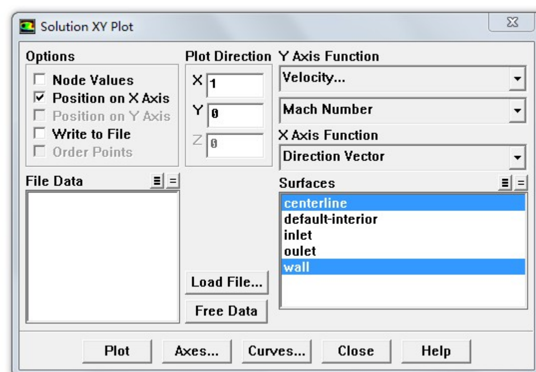


图 13-78　Solution XY Plot 对话框

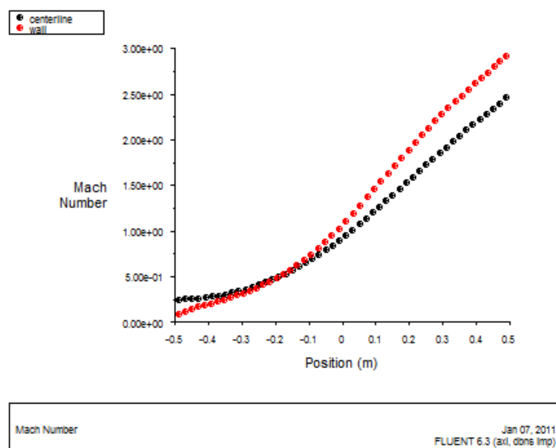


图 13-79　轴向和壁面上马赫数的变化

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章
FLUENT 6.3
综合应用实例

15 同理，改变 Y Axis Function 下拉列表框中的选项，可以得到对应的轴向和壁面压力、温度的分布曲线，如图 13-80 和图 13-81 所示。

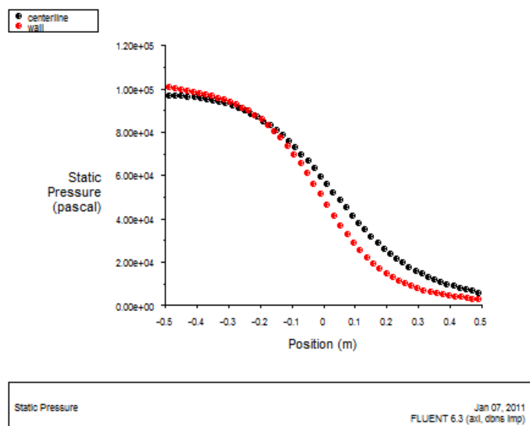


图 13-80　轴向和壁面总压力分布图

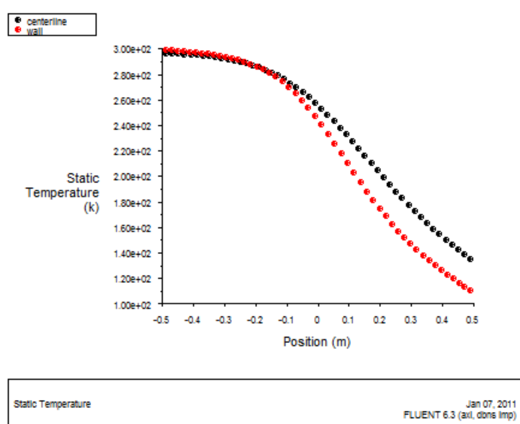


图 13-81　轴向和壁面温度分布图

16 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model3.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model3.dat。

17 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

13.4　U 形管内流体运动分析

1. 实例概述

假设水流通过一个*x*方向上的U形管，该弯管的横截面为边长 75.5mm的正方形，水平进口管长 300mm，如图 13-82 所示。水流以 10m/s的速度匀速通过弯管。根据流体力学的控制数量分析，可以判断壁压满足：$F=2 \cdot U \cdot (\rho UA)$，其中$U$=10m/s，$\rho$=998kg/m^3，$A$=0.0057m^2，计算后得$F$=1,138 N。现在利用FLUENT 6.3 模拟管道内的流体流动。

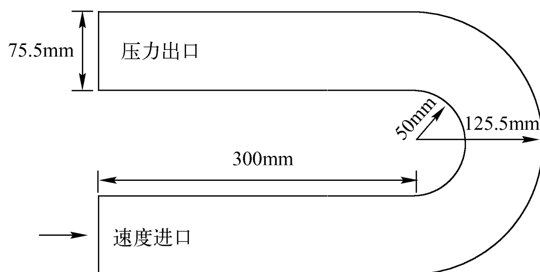


图 13-82　U 形管实例图

2. 模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。



02 单击 Geometry→Vertex→Create Real Vertex，按照表 13-1 创立各点。

表 13-1　各点坐标

x	y	z
0	−0.05	0
0	−0.1255	0
−0.3	−0.1255	0
−0.3	−0.05	0
−0.3	0.05	0
−0.3	0.1255	0
0	0.1255	0
0	0.05	0
0.05	0	0
0.1255	0	0

03 单击右下角 Global Control 面板中的 Fit to Window按钮，使图像与窗口尺寸吻合，便于下步的操作。

04 接着创建线，单击 Geometry→Edge→Create Straight Edge，先创建直线，按住〈Shift〉按键，再单击坐标点，就可以直接选中。选中想要连接的两个点后，单击 Apply 按钮。接着创建弧线，用鼠标右键单击，会出现级联菜单，选择 arc，出现 Create Real Circular Arc 面板，单击中间 3 点相连的图标，如图 13-83 所示。选中所要连接成半圆的 3 个点，单击 Apply 按钮，最后画好的边框图形如图 13-84 所示。

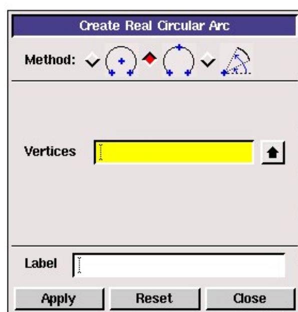


图 13-83　Create Real Circle Arc 面板

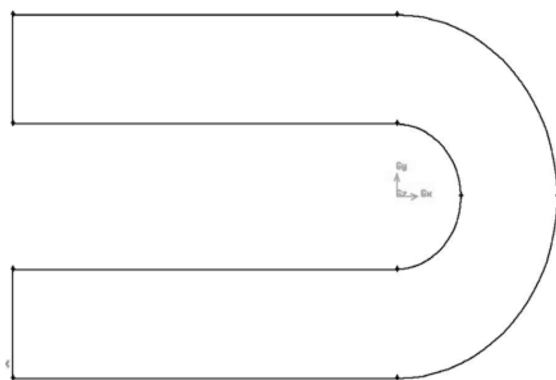


图 13-84　边框图形

05 单击 Geometry→Face→Create Faces From Wireframe，选择图形各个边缘，单击 Apply 按钮，完成对面的建立。

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选中需要进行网格划分的面 1，运用 Quad 单元与 Map 方法对这个面进行划分，在 Interval Size 左边的 Spacing 中填写 0.003，单击 Apply 按钮，网格生成情况如图 13-85 所示。

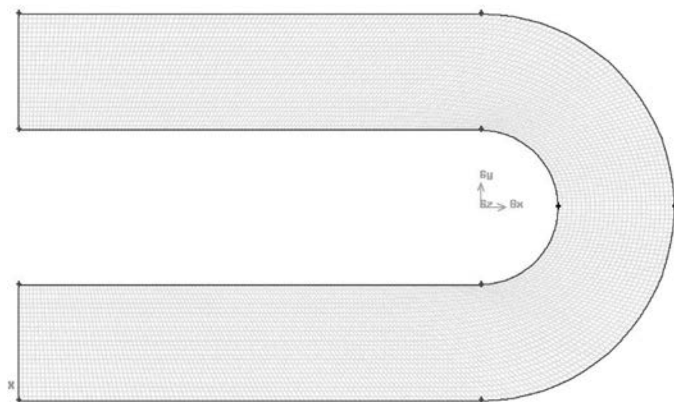


图 13–85　面网格的划分

02 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中将左下边的线段定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 inlet；将左上边的线段定义为压力出口（PRESSURE_OUT），名称为 outlet；4 条直线定义为 WALL，名称为 horiz_walls；2 条曲线定义为 WALL，名称为 bend_walls。

03 单击 Zones→Specify Continuum Types，出现如图 13–86 所示的 Specify Continuum Types 面板，在 Entity 选项中选中 Face.1，Type 为 FLUID，单击 Apply 按钮，完成面的定义。

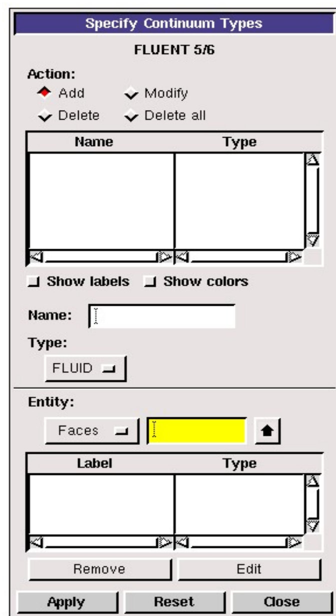


图 13–86　Specify Continuum Types 面板

04 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model4.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 2ddp 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 Model4.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Define→Models→Viscous…命令，在对话框中选择 Inviscid（无粘流模型），单击 OK 按钮。

04 执行 Define→Materials 命令，单击 Fluent Database 按钮，在 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中选择 water-liquid[h2o<l>]，单击 COPY，CLOSE 按钮。在 Materials 对话框的 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中选择 water-liquid[h2o<l>]，单击 Change/Create 按钮。

05 执行 Define→Operating Conditions…命令，弹出 Operating Conditions 对话框，选择 Gravity，将 Y 的文本框改为−9.81，单击 OK 按钮。

06 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，如



图 13-87 所示。

❶在列表中选择 face，其类型（Type）为 fluid，单击 Set…按钮，将 Material Name 改为 water-liquid，单击 OK 按钮。

❷选择 intlet，选择 Type 为 velocity_inlet，单击 Set…按钮，将 Velocity Magnit 改为 10m/s，单击 OK 按钮。

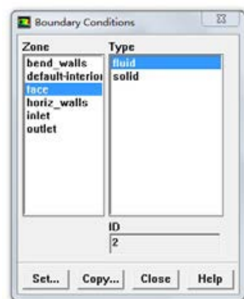


图 13-87　Boundary Conditions 对话框

07 执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 inlet，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

08 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在 Residual Monitors对话框中选中Plot，Plotting的Window文本框改为 1，各变量收敛精度要求为 10^{-5}，单击OK按钮。执行Solve→Iterate…命令，设置Number of Iteration为1000，单击Iterate按钮开始求解。288 步以后达到收敛，其残差曲线图如图 13-88 所示。

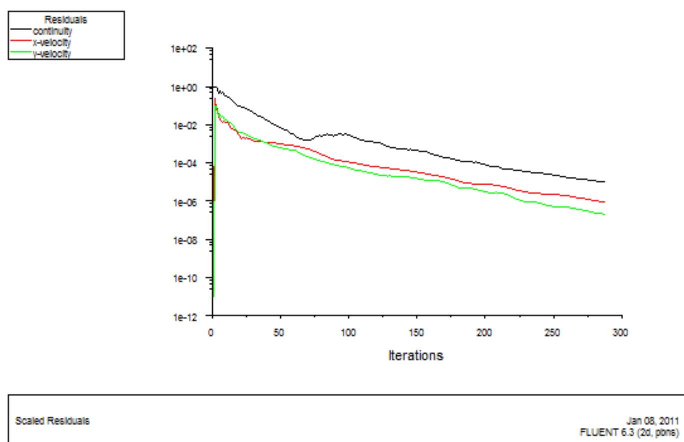


图 13-88　残差曲线图

09 迭代完成后，执行 Display→Contours 命令，输出本例的绝对压力云图、速度分布云图，如图 13-89 和图 13-90 所示。执行 Display→Vectors 命令，输出速度矢量图，如图 13-91 所示。

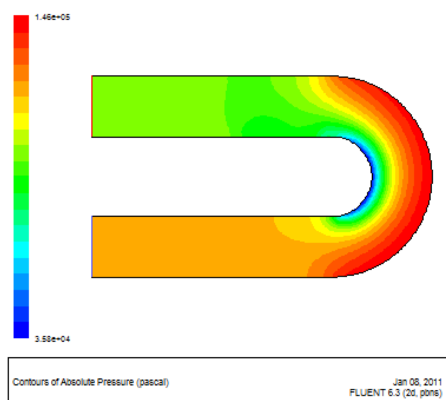


图 13-89　绝对压力云图

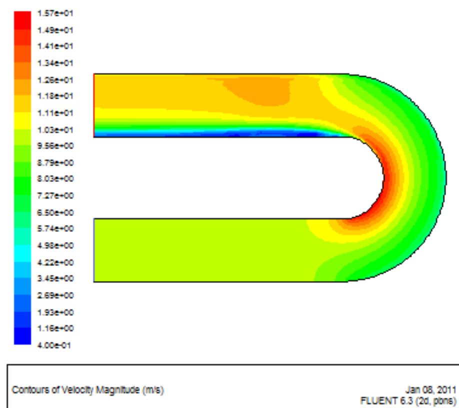


图 13-90　速度分布云图

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例



10 执行 Report→Force…命令，在如图 13-92 所示的 Force Reports 对话框的 Wall Zones 下选择 bend_walls。单击 Print 按钮，得到弯壁处的压力 16878N，如图 13-93 所示。因为是二维模拟，所以还得乘以方管的边长 75.5mm，最后得到 x 方向上的压力为 1274.3N。

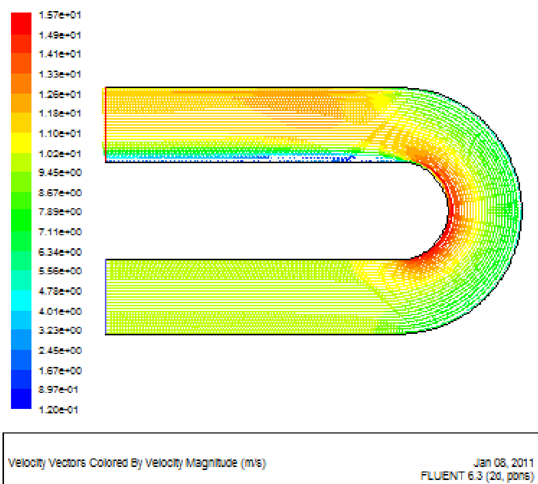


图 13-91 速度矢量图

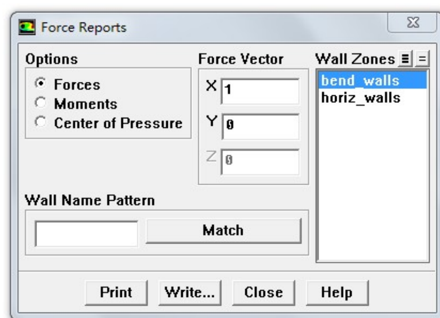


图 13-92 Force Reports 对话框

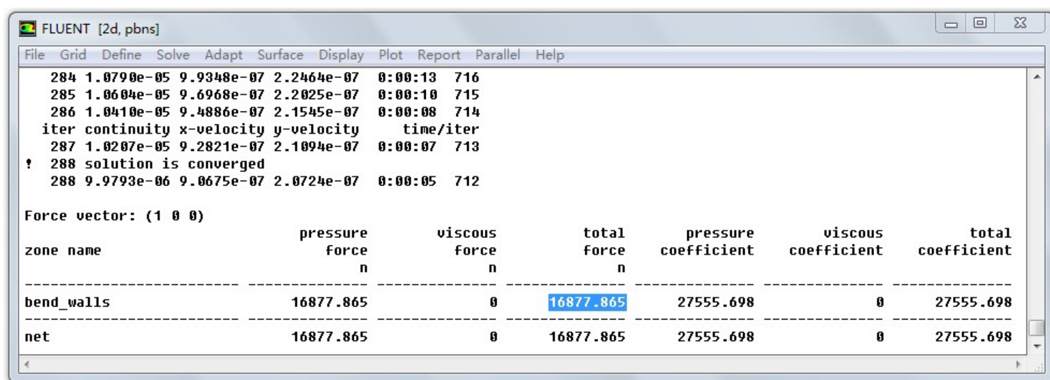


图 13-93 计算结果

11 执行Plot→XY Plot命令，选择Pressure和Absolute Pressure，X文本框中填写 0，Y 文本框中填写 1，Surfaces选项选择inlet，如图 13-94 所示。单击Plot按钮，即出现进口处绝对压力变化图，如图 13-95 所示。从图 13-95 中我们可以看到进口压强为 1.19×10^5Pa，故得到进口处压力(119,000−101,325) ×0.0057=101 N，1274.3−101=1,173.3 N。

12 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model4.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model4.dat。

13 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。



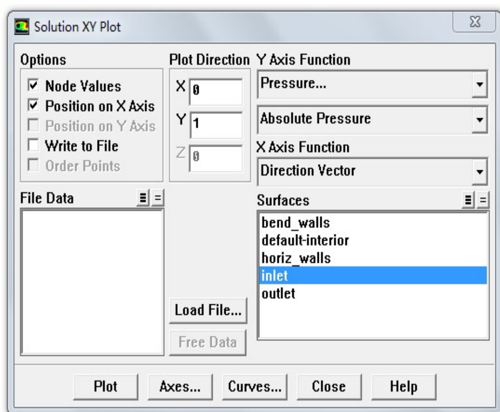


图 13-94　Solution XY Plot 对话框

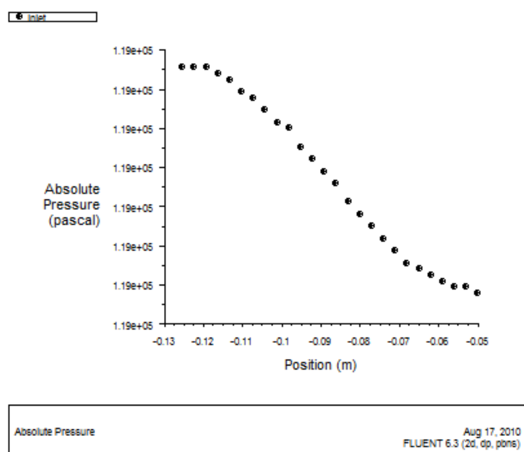


图 13-95　进口处绝对压力变化图

13.5　套管内气液两相流动模拟

1．实例概述

假设一个高 3m，内圆半径 0.063m，外圆半径 0.160m 的圆筒形套管，机油与空气的混合物从下部入口进入，空气流速为 1.7m/s，机油流速为 1.6m/s，如图 13-96 所示。空气的体积分数为 0.02，气泡直径为 0.001m，用 FLUENT 6.3 模拟套管内气液两相的流动。

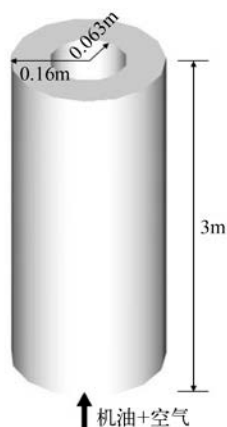


图 13-96　套管模拟图

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 → → ，在 Create Real Circular Face 面板的 Radius 文本框中先输入 0.16，保持 Plane 为 XY，如图 13-97 所示。单击 Apply 按钮，然后在 Radius 文本框中输入 0.063，单击 Apply 按钮，得到如图 13-98 所示的图形。

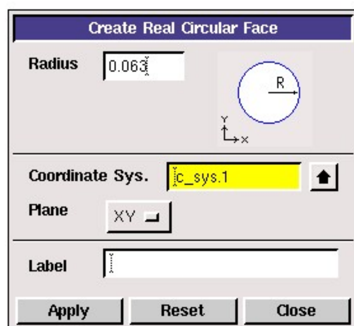


图 13-97　Create Real Circular Face 面板

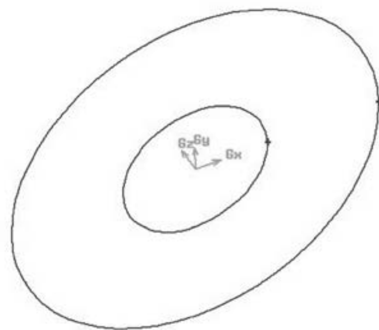


图 13-98　几何面域

03 单击 Face 面板中的 Subtract Real Faces 按钮，在弹出的 Subtract Real Faces 面板

的第一行 Face 文本框中选取大圆面 Face.1，在第二行的 Face 文本框中选取小圆面 Face.2，单击 Apply 按钮，即可以得到环空的横截面。

04 单击 Geometry→Vertex →Create Real Vertex→，按照表 13-2 创立各点。单击 Apply 按钮，生成管轴上的另一点。

表 13-2 各点坐标

x	y	z
0	0	0
0	0	3

05 接着创建线。单击 Geometry→Edge→Create Straight Edge，按住〈Shift〉按键，再单击上步创建的两个点，单击 Apply 按钮，生成环空体轴线，如图 13-99 所示。

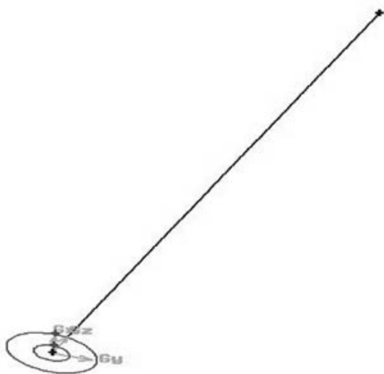


图 13-99 绘制轴线

06 单击 Geometry→Faces→Sweep Faces，弹出 Sweep Faces 面板，如图 13-100 所示。在 Faces 文本框中选取 face.1，选择 Path 为 Edge，在 Edge 中选取刚绘制的轴线，保持 Type 为 Rigid，单击 Apply 按钮，得到几何体，如图 13-101 所示。

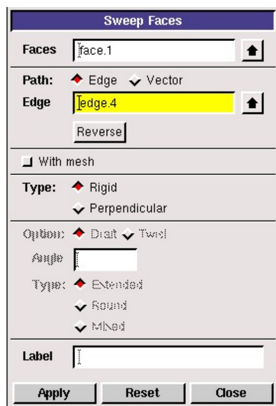


图 13-100 Sweep Faces 面板

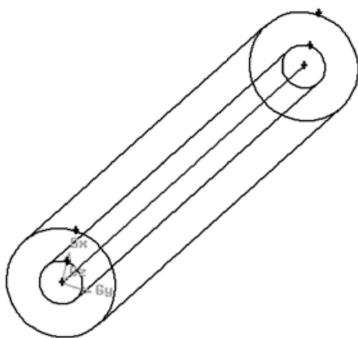


图 13-101 环空几何体

07 去掉几何体轴线。单击 Edge 面板中的 Delete Edges 按钮，选中轴线，单击



Apply 按钮，将轴线删除。

08 为了划分网格方便，需要对几何体进行划分，生成一个用于剖分体的面。单击 Geometry→Face→Create Real Rectangular Face，在 Create Real Rectangular Face 面板中的 Width 文本框和 Height 文本框中分别输入 20 和 10，选择 Direction 为 ZX Centered，单击 Apply 按钮。

09 单击 Geometry→Volume→Split Volume，出现如图 13-102 所示的 Split Volume 面板，在其中选择 volume.1，选取 Split With 为 Faces(Real)，然后选择 Faces 为行生成的剖分面，单击 Apply 按钮，得到如图 13-103 所示的图形。

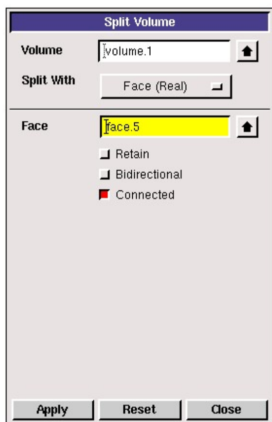


图 13-102　Split Volume 面板

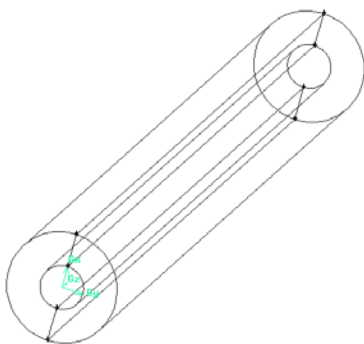


图 13-103　分割后的几何体

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Edge→Mesh Edges，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色文本框中选择径向的 4 条线段，采用 Interval Count 的方式将其分为 5 段。同理，将轴向线段分为 50 段，内外圆弧分为 20 段，得到线网格，如图 13-104 所示。

02 单击 Mesh→Face→Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选择划分有线网格的横截面和轴向剖面，运用 Quad 单元与 Map 的方式，单击 Apply 按钮，网格生成情况如图 13-105 所示。

03 单击 Mesh→Volume→Mesh Volume，选中要分割的两个体，采用 Hex 和 Map 的划分方式，得到体网格，如图 13-106 所示。

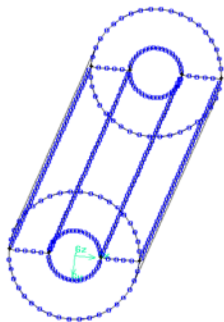


图 13-104　线网格的划分

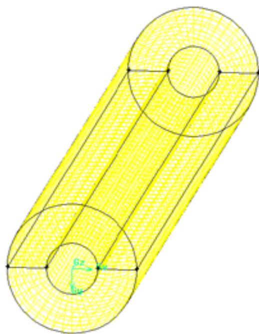


图 13-105　面网格的划分

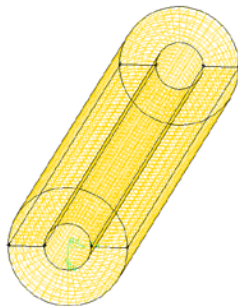


图 13-106　体网格的划分

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

04 单击 Zones →Specify Boundary Types ，在 Specify Boundary Types 面板中将下部的两个面（Face.1 和 Face.6）定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in；将上部的两个面（Face.4 和 Face.10）定义为自由流出边界（OUTFLOW），名称为 out；选择内壁面定义为 WALL，名称为 wall_in；选择外壁面定义为 WALL，名称为 wall_out。

05 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model5.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 3d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 Model5.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Define→Models→Solver…命令，弹出 Solver 对话框，保持默认值，单击 OK 按钮。

04 执行 Define→Models→Multiphase…命令，在弹出的 Multiphase Model 对话框中选择 Mixture 单选按钮，勾选 Slip Velocity 复选框和 Implicit Body Force 复选框，如图 13-107 所示。单击 OK 按钮完成。

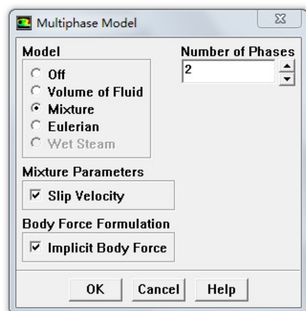


图 13-107　Multiphase Model 对话框

05 执行 Define→Models→Viscous…命令，在对话框中选择 k-epsilon[2 eqn]（湍流模型），保持默认值，单击 OK 按钮。

06 执行 Define→Materials 命令，单击 Fluent Database 按钮，在 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中选择 engine-oil，单击 Copy，Close 按钮。在 Materials 对话框中的 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中会出现 air 和 engine-oil，单击 Close 按钮，完成对材料的定义。

07 执行 Define→Phases…命令，对物相进行定义。在如图 13-108 所示的 Phases 对话框的 Phase 列表中选择 phase-1，在 Type 中选择 primary-phase，然后单击 Set…按钮。在出现的对话框的 Phase Material 下拉列表框中选择 engine-oil，Name 文本框填写 engine-oil，单击 OK 按钮。回到 Phases 对话框，单击 phase-2，Type 选择 secondary-phase，单击 Set…按钮，在弹出的对话框的 Phase Material 下拉列表框中选择 air，将 Name 文本框改为 air，将 Properties 选项组中的 Diameter 文本框输入气泡直径 0.001，单击 OK 按钮，如图 13-109 所示。

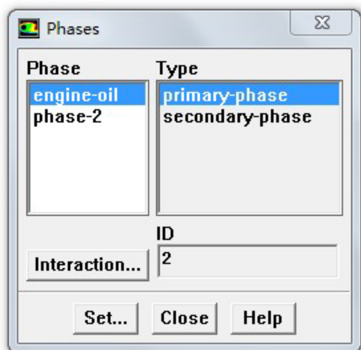


图 13-108　Phases 对话框

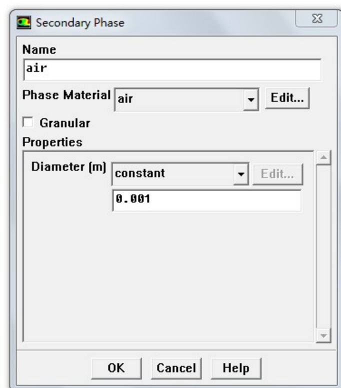


图 13-109　物相的设置



08 回到 Phase 对话框，单击 Interaction 按钮，弹出 Phase Interaction 对话框，如图 13-110 所示。选择 Drag Coefficient 选项组中的 schiller-naumann 来计算机油和气泡之间的阻力。单击 Slip 标签，默认滑移的速度公式为 manninen-et-al，单击 OK 按钮。

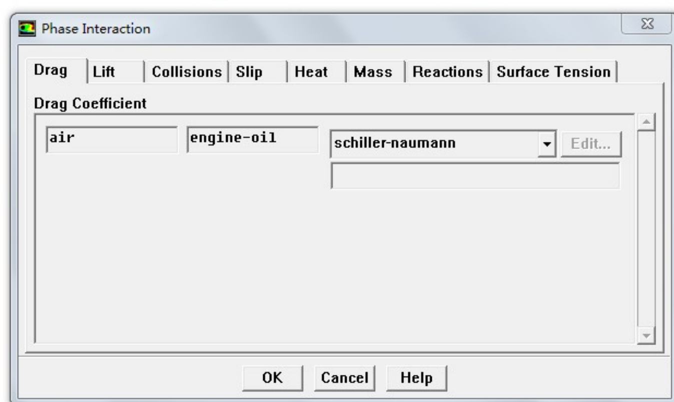


图 13-110　Phase Interaction 对话框

09 执行 Define→Operating Conditions...命令，弹出 Operating Conditions 对话框，选择 Gravity，指定重力方向为 Z 轴，将 Z 文本框改为-9.81，同时选择 Specified Operating Density 复选框，文本框中输入 0，如图 13-111 所示。单击 OK 按钮完成。

10 执行 Define→Boundary Conditions...命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，如图 13-112 所示。

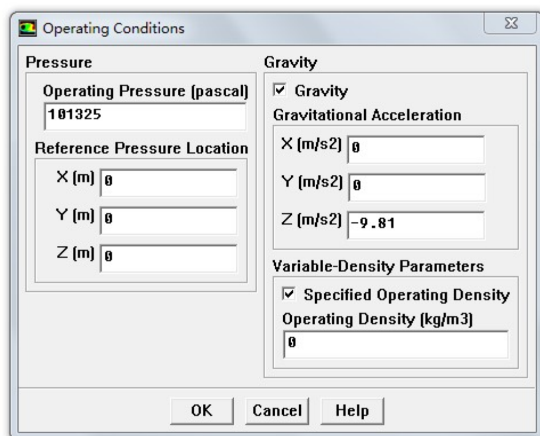


图 13-111　Operating Conditins 对话框

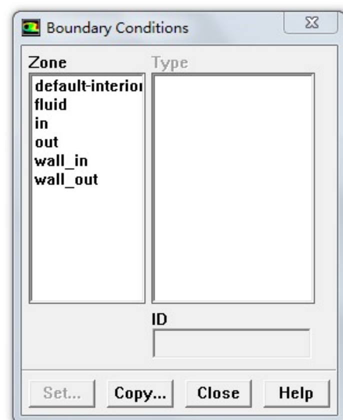


图 13-112　Boundary Conditions 对话框

❶在列表中选择 in，其类型（Type）为 velocity-inlet，保持 Phase 为 mixture，单击 Set...按钮。在 Velocity Inlet 对话框中选择 Specification Method 下拉列表框中的 Intensity and Hydraulic Diameter，在 Turbulent Intensity 文本框中输入 10，在 Hydraulic Diameter 文本框中输入 0.194（外环直径减去内环直径），如图 13-113 所示。单击 OK 按钮完成。

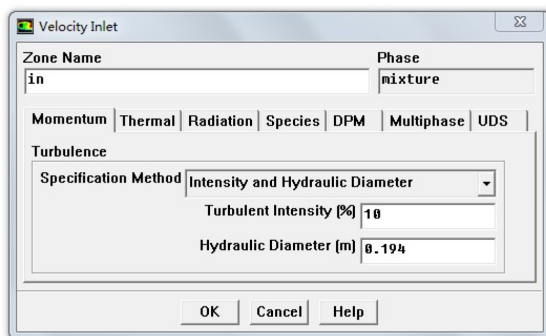


图 13-113　混合物速度进口设置

❷回到 Boundary Conditions 对话框，仍选择 in，将 Phase 改为 engine-oil，单击 Set…按钮。在如图 13-114 所示的 Velocity Inlet 对话框中选择 Magnitude，Normal to Boundary，保持 Reference Frame 为 Absolute，Velocity Magnitude 为 1.6，单击 OK 按钮。

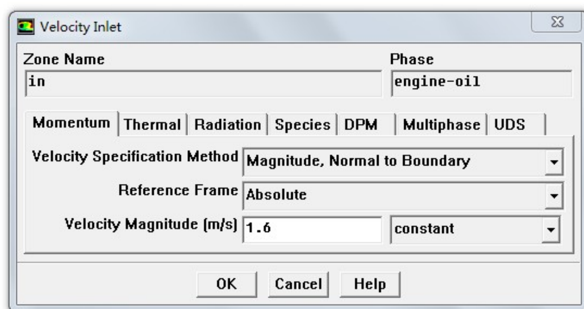


图 13-114　机油速度进口设置

❸回到 Boundary Conditions 对话框，仍选择 in，将 Phase 改为 air，单击 Set…按钮。在如图 13-115 所示的 Velocity Inlet 对话框中选择 Magnitude，Normal to Boundary，保持 Reference Frame 为 Absolute，Velocity Magnitude 为 1.7。由于入口处空气的体积分数为 0.02，所以单击 Multiphase 选项，在 Volume Fraction 文本框中输入 0.02，单击 OK 按钮。

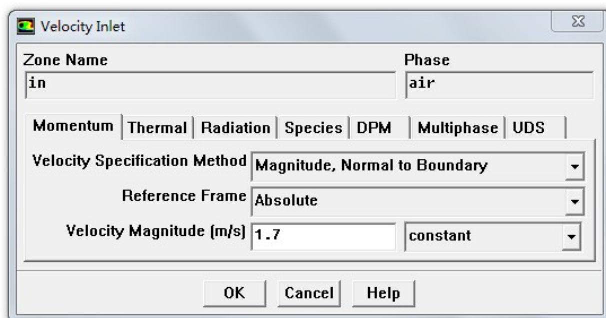


图 13-115　空气速度进口设置



❹回到 Boundary Conditions 对话框，选择 out，选择 Type 为 outflow，Phase 为 mixture，单击 Set...按钮。在 Outflow 对话框中保持默认值，如图 13-116 所示。单击 OK 按钮完成。

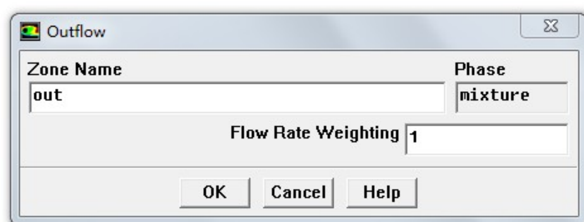


图 13-116　出口定义

11 执行 Solve→Control→Solution...命令，保持默认值，单击 OK 按钮。

12 执行 Solve→Initialize→Initialize...命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 in，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

13 执行 Solve→Monitors→Residual...命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，保持默认收敛精度，单击 OK 按钮。

14 执行 Solve→Iterate...命令，设置 Number of Iteration 为 1000，单击 Iterate 按钮开始求解。图 13-117 为求解出的残差曲线图。

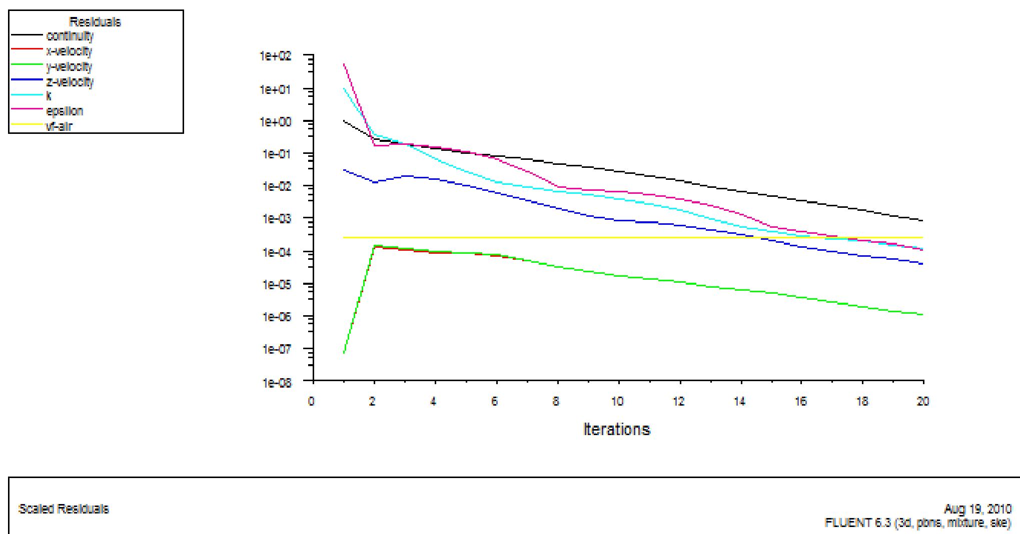


图 13-117　残差曲线图

15 迭代完成后，为显示立体的流场变化，需要定义轴向剖面。执行Surface→Plane...命令，在弹出的Plane Surface对话框中，输入x_0、y_0、z_0为 0、0、0；x_1、y_1、z_1为 0、0、3；x_2、y_2、z_2为 1、0、3，并在New Surface Name文本框中输入z-h，如图 13-118 所示。单击Create按钮生成轴向剖面。

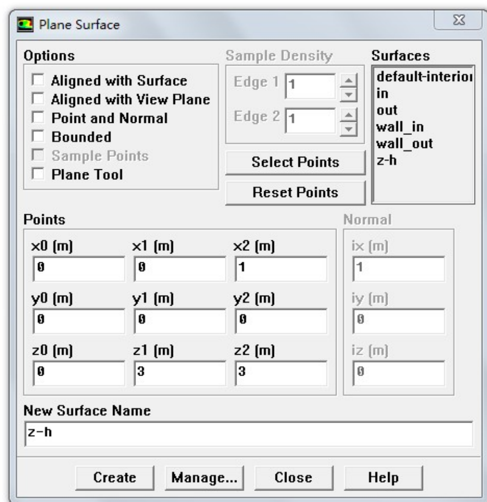


图 13-118 Plane Surface 对话框

16 执行 Display→Contours 命令，在 Contours 的对话框 Surfaces 中选择已经定义的轴向剖面 z-h，选择 Contours of 下拉列表框中的 Pressure 和 Static Pressure，保持 Phase 列表中的 mixture，勾选 Filled，单击 Display 按钮，得到压强分布云图，如图 13-119 所示。改变 Contours of 下拉列表框中的 Velocity 和 Velocity Magnitude，并选择 Phase 列表中的 air，单击 Display 按钮，得到空气的速度分布云图，如图 13-120 所示。若选择 engine-oil，则可以得到机油的速度分布云图。

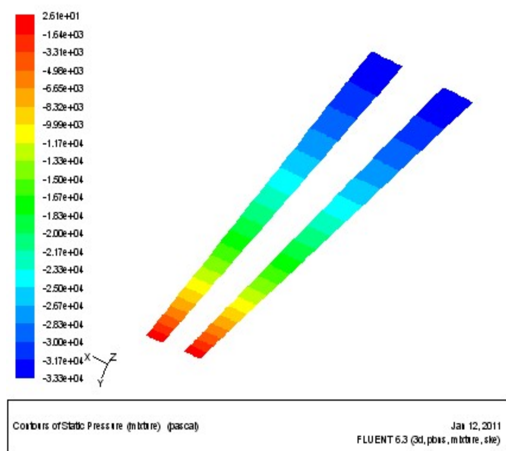


图 13-119 压强分布云图

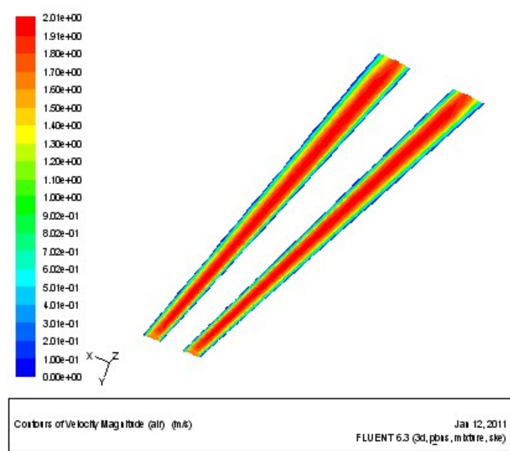


图 13-120 空气的速度分布云图

将 Contours of 下拉列表框中改为 Phase 和 Volume Fraction，选择 Phase 列表中的 air，单击 Apply 按钮，可以得到空气的体积分布云图，如图 13-121 所示。同理可以得到机油的体积分布云图。执行 Display→Vectors…命令，可得到速度矢量图，如图 13-122 所示。



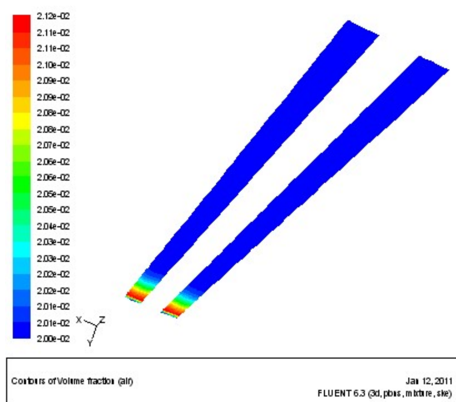


图 13-121　空气的体积分布云图

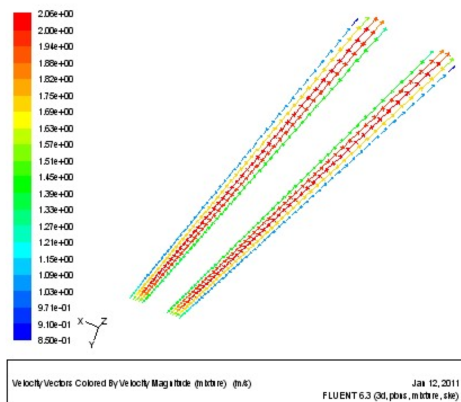


图 13-122　速度矢量图

17 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model5.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model5.dat。

18 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

13.6　三维室内温度传热模拟

1．实例概述

图 13-123 所示为室内壁挂空调的空间简图，相对空调来说，上端为空气进口，下端为空气出口；而相对房间而言，下方为空气进口，上方为空气出口。假设房间环四壁温度为 36℃，天花板与地面温度为 26℃，空调制冷温度为 21℃，空气流动速度为 0.1m/s。用 FLUENT 6.3 模拟该房间内温度的分布情况。

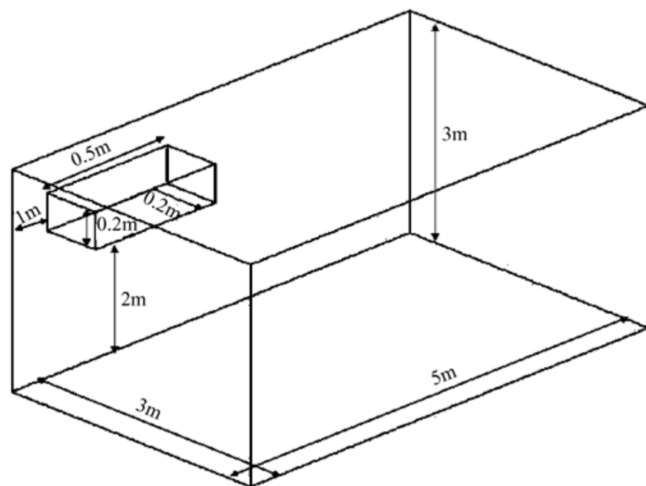


图 13-123　室内壁挂空调模拟图

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 Geometry →Volume →Create Real Brick ，在如图 13-124 所示的 Create Real Brick 面板的 Drection 中选择+X+Y+Z，在 Width(X)、Depth(Y)、Height(Z)中分别输入 5、3、3，单击 Apply 按钮，得到如图 13-125 所示的六面体。同理以坐标原点为左下角顶点生成空调的模拟图形。

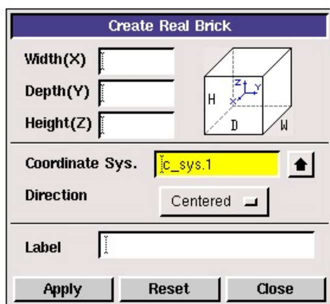


图 13-124　Create Real Brick 面板

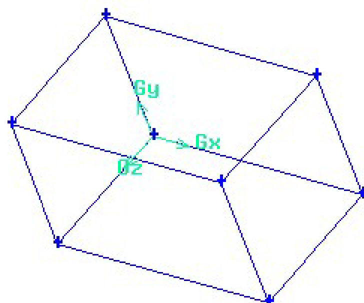


图 13-125　六面体

03 单击 Volume 面板中的 Move/Copy Volume 按钮，在弹出的 Move/Copy Volume 面板中选择空调（体 2），保持 Move 为选中状态，在 x、y、z 文本框中分别输入 1、2.8、2，单击 Apply 按钮，即可以得移动后的空调位置图，如图 13-126 所示。

04 由于要研究的是室内空气的传热，所以计算区域不应包括空调所在的六面体。单击 Volume 面板中的 Substract Real Volume 按钮，在弹出的 Substract Real Volume 面板中先选择 volume.1，再在下一行中选择 volume.2，单击 Apply 按钮，即除去了计算几何体中的小六面体。

3．网格的划分

01 单击 Mesh →Volume →Mesh Volume ，选中 volume.1，采用 Hex 和 Submap 的划分方式，设置网格尺寸为 0.05，单击 Apply 按钮，得到体网格，如图 13-127 所示。

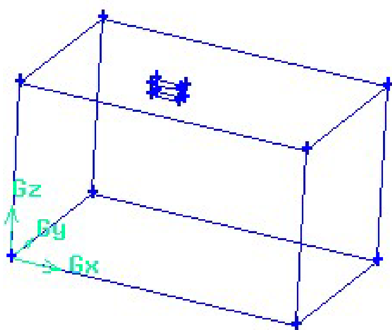
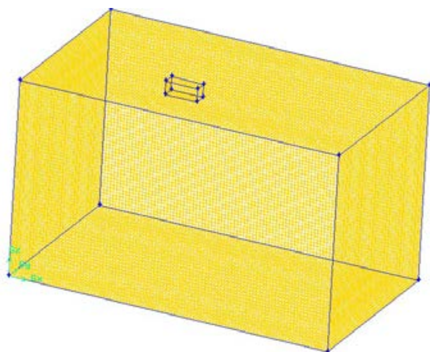


图 13-126　空间立体模拟


图 13-127　体网格的划分

02 单击 Zones →Specify Boundary Types ，在 Specify Boundary Types 面板中将空调下部的面定义为速度入口（VELOCITY_INLET），名称为 in；将上部的面定义为自由出口（OUTFLOW），名称为 out；选择空调的壁面定义为 WALL，房间的上下、四周壁面也定义为 WALL。



03 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model6.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 3d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 Model6.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Define→Models→Solver…命令，弹出 Solver 对话框，保持默认值，单击 OK 按钮。

04 执行 Define→Models→Viscous…命令，在对话框中选择 k-epsilon[2 eqn]（湍流模型），保持默认值，单击 OK 按钮。

05 激活传热计算，单击 Define→Models→Energy 命令，选择 Energy Equation 选项。

06 执行 Define→Materials 命令，单击 Fluent Database 按钮，在 Fluent Solid Materials 下拉列表框中选择 steel，单击 Copy，Close 按钮。在 Materials 对话框中的 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中会出现 air，Solid 下拉列表框中出现 steel，单击 Close 按钮，完成对材料的定义。

07 执行 Define→Operating Conditions…命令，保持默认值，单击 OK 按钮。

08 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，如图 13-128 所示。

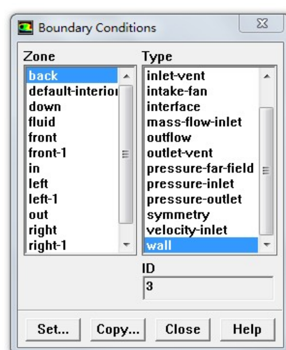


图 13-128 Boundary Conditions 对话框

❶在列表中选择 in，其类型（Type）为 velocity-inlet，单击 Set…按钮。在 Velocity Inlet 对话框中选择 Specification Method 下拉列表框中的 Magnitude，Normal to Boundary，在 Velocity Magnitude 中输入 0.1。湍流模式选择 K and Epsilon，在 Turublent Kinetic Energy 中输入 0.02，Turublent Dissipation Rate 中输入 0.008，如图 13-129 所示。单击 Thermal 标签，在 Temperature 文本框中输入 294.15K，单击 OK 按钮。

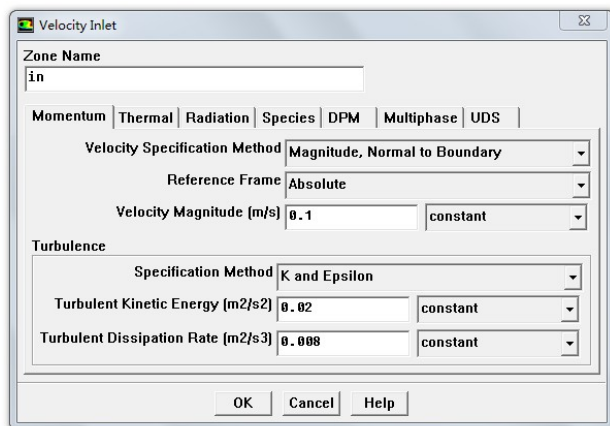


图 13-129 速度进口设置

❷回到 Boundary Conditions 对话框，选择 out，选择 Type 为 outflow，单击 Set…按钮。在如图 13-130 所示的 Outflow 对话框中保持默认值，单击 OK 按钮完成。



图 13-130　出口定义

❸在列表中选择 left，其类型（Type）为 WALL，单击 Set…按钮。单击 Thermal 标签，选择 Thermal Conditions 下方的 Convection 单选按钮。在 Heat Transfer Coefficient 文本框中输入 10，在 Free StreamTemperature 文本框中输入 309.15K，在 Wall Thickness 文本框中输入 0.2m，Heat Generation Rate 为 0，选择材料为 Steel，如图 13-131 所示。单击 OK 按钮完成。

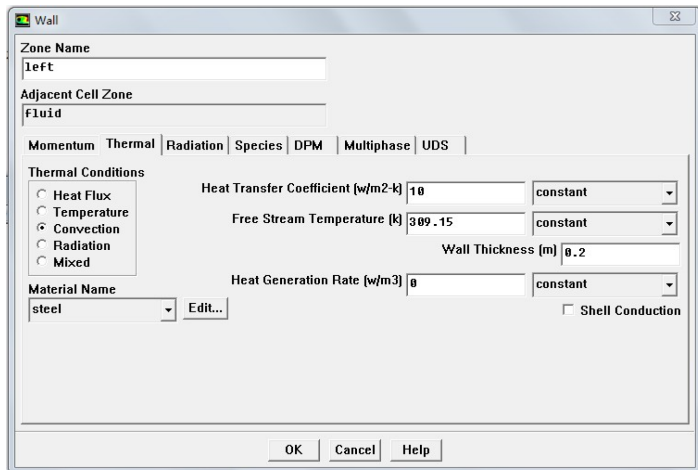


图 13-131　壁面定义

❹同理，设置 right、front、back、up、down 5 个边界，上下壁面的温度要改成 299.15K。空调壁面的设置与房间一样，只是温度改为 302.15K，Heat Transfer Coefficient 文本框中输入 20，Wall Thickness 文本框中输入 0.002。

09 执行 Solve→Control→Solution…命令，保持默认值，单击 OK 按钮。

10 执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 in，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

11 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，保持默认收敛精度，单击 OK 按钮。

12 执行 Solve→Iterate…命令，设置 Number of Iteration 为 1000，单击 Iterate 按钮开始求解。图 13-132 为求解出的残差曲线图。

迭代完成后，为显示立体的流场变化，需要定义几个具有代表性的剖面。



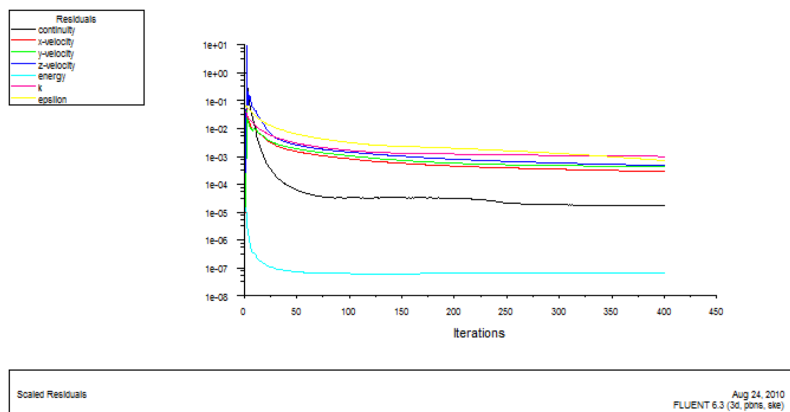


图 13-132　残差曲线图

13 执行 Surface→Plane...命令，在弹出的 Plane Surface 对话框中，按照表 13-3 输入数据，单击 Create 按钮生成轴向剖面。

表 13-3　各点坐标

	NAME	(x_0,y_0,z_0)	(x_1,y_1,z_1)	(x_2,y_2,z_2)
X 方向横截面	X-1	(1,0,0)	(1,0,3)	(1,3,3)
	X-2	(1.25,0,0)	(1.25,0,3)	(1.25,3,3)
	X-3	(2.5,0,0)	(2.5,0,3)	(2.5,3,3)
	X-4	(4,0,0)	(4,0,3)	(4,3,3)
Y 方向横截面	Y-1	(0,1,0)	(0,1,3)	(5,1,3)
	Y-2	(0,1.5,0)	(0,1.5,3)	(5,1.5,3)
	Y-3	(0,2.8,0)	(0,2.8,3)	(5,2.8,3)
Z 方向横截面	Z-1	(0,0,1)	(0,3,1)	(5,3,1)
	Z-2	(0,0,2)	(0,3,2)	(5,3,2)

14 执行 Display→Contours 命令，在 Contours 对话框的 Surfaces 中选择已经定义的 X 方向剖面 X-1、X-2、X-3、X-4，选择 Contours of 下拉列表框中的 Temperature 和 Static Temperature，勾选 Filled，单击 Display 按钮，得到温度分布云图，如图 13-133 所示。

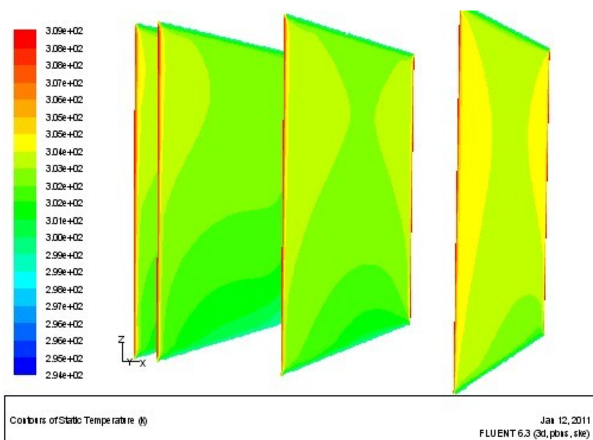


图 13-133　X 方向剖面的温度分布云图

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例



❶勾选 Contours 对话框中的 Draw Grid，弹出 Grid Display 对话框，如图 13-134 所示。选择 Surfaces 中的壁面，选择 Edge Type 中的 Outline 单选按钮，单击 Display 按钮，得到模型轮廓线，如图 13-135 所示。单击 Close 按钮关闭 Grid Display 对话框后，回到 Contours 对话框，再次单击 Display 按钮，得到 X 方向上几何体的温度分布云图，如图 13-136 所示。

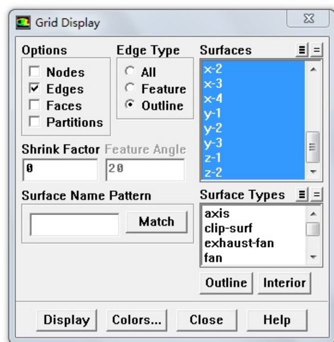


图 13-134　Grid Display 对话框

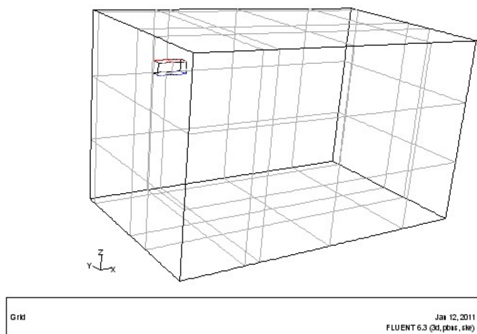


图 13-135　模型轮廓图

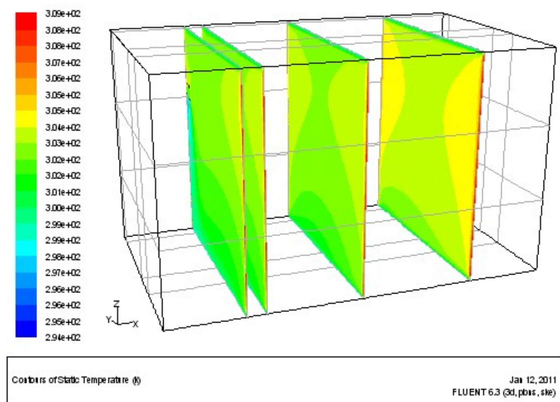


图 13-136　X 方向上几何体的温度分布云图

❷同理，显示出 Y 方向上几何体的温度分布云图，如图 13-137 所示。Z 方向上几何体的温度分布云图，如图 13-138 所示。

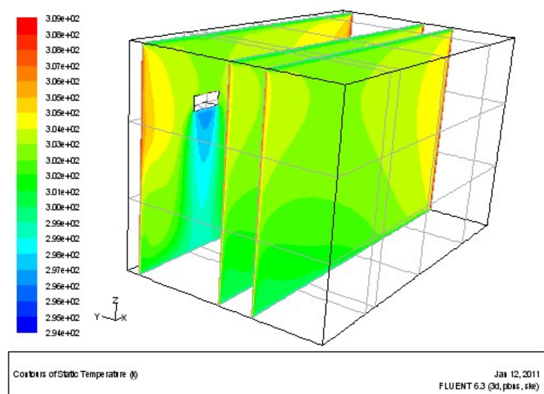


图 13-137　Y 方向上几何体的温度分布云图



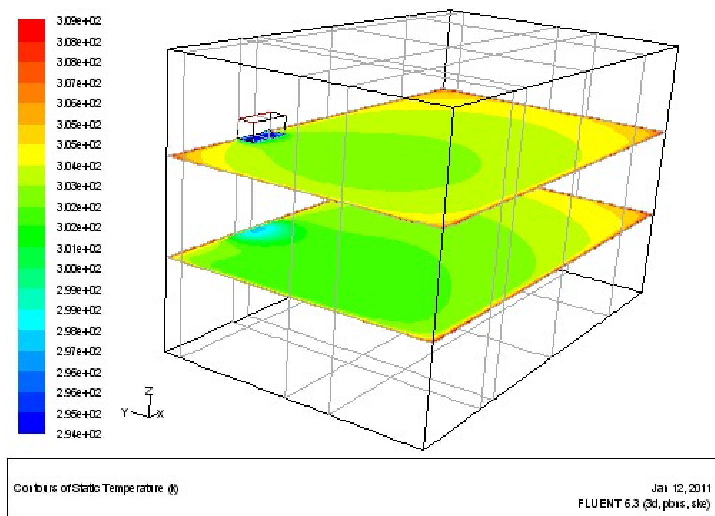


图 13-138　Z 方向上几何体的温度分布云图

❸单击鼠标中键放大空调附近温度分布云图，如图 13-139 所示。

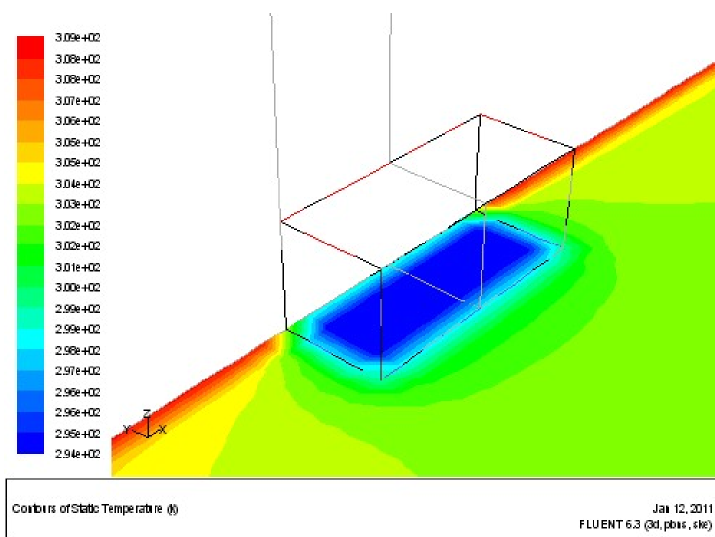


图 13-139　空调附近温度分布云图

15 执行 Display→Vectors...命令，在 Surfaces 中选择 Y-3 面，将 Scale 改为 2，单击 Display 按钮，可得到截面 Y-3 速度矢量图，如图 13-140 所示。同理可以选择空调面 Z-2，显示空调面上的速度矢量图，如图 13-141 所示。

16 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data...命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model6.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model6.dat。

17 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

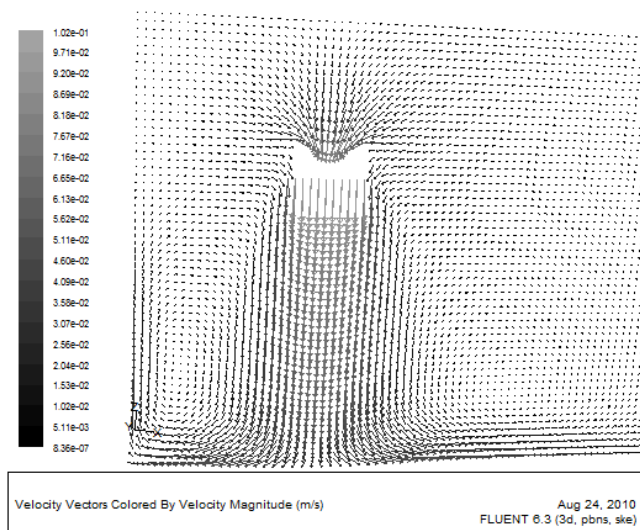


图 13-140　截面 Y-3 速度矢量图

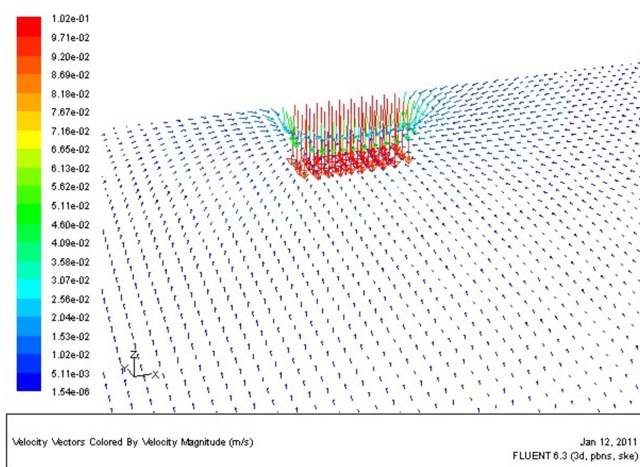


图 13-141　空调面上的速度矢量图

13.7　液相凝固温度模拟

自然界中存在着三态：气态、液态、固态。随着温度的变化这三态也在不断地循环。在一些实际工程中也存在着大量与凝固、融化、蒸发相关的问题，下面通过实例来用 FLUENT 6.3 对此类问题进行数值模拟。

1．实例概述

图 13-142 所示为一个圆桶，其中装满了 35℃的液态苯，将其放在 0℃的环境下，部分液态苯将会凝固。已知常压下苯的熔化热为 127128J/kg，熔点和凝固点为 5℃。下面用 FULENT 6.3 模拟苯凝固的过程。



2．模型的建立

单击 Geometry →Volume →Create Real Cylinder，弹出 Create Real Cylinder 对话框，在 Height、Radius1 和 Radius2 文本框中分别输入 5、2 和 2，保持 Center Axis 为 Z 轴，单击 Apply 按钮，出现一个三维圆环，如图 13−143 所示。

3．网格的划分

01 单击 Mesh →Volume →Mesh Volumes，打开 Mesh Volumes 面板，Interval Size 文本框输入 0.1，其他保持默认值，单击 Apply 按钮，完成对体网格的划分，如图 13−144 所示。

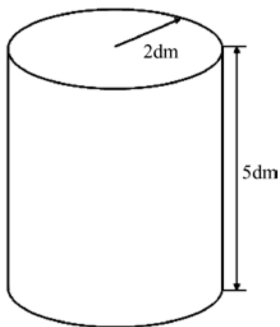


图 13−142　圆桶模型

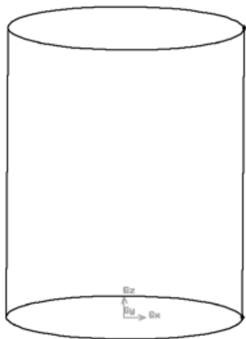


图 13−143　圆桶模型



图 13−144　体网格的划分

02 单击 Zones →Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中将底部壁面定义为 WALL，命名为 bottom；顶部壁面定义为 WALL，命名为 top；剩下的壁面命名为 side。

03 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model7.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 3d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 Model7.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Grid→Scale 命令，将 Scale Factor 改写为 0.1，单击 Scale 按钮。

04 执行 Define→Models→Solver…命令，弹出 Solver 对话框，保持默认值，单击 OK 按钮。

05 执行 Define→Models→Solidification & Melting…命令，弹出 Solidification and Melting 对话框，勾选 Solidification/Melting 复选框，如图 13−145 所示。单击 OK 按钮完成。

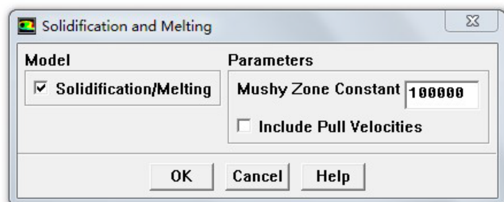


图 13−145　Solidification and Melting 对话框

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

06 执行 Define→Models→Energy 命令，这时候能量方程因为执行了 Solidification and Melting 命令而启动。

07 执行 Define→Materials 命令，单击 Fluent Database 按钮，在 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中选择 benzene-liquid[c6h6<1>]，单击 Copy 按钮回到 Material 对话框，在 Properties 选项组中将 Melting Heat 文本框输入 773.448，Solidus Temperature 为 278；Liquidus Temperature 为 278，单击 Change/Create 和 Close 按钮，完成对材料的定义，如图 13-146 所示。

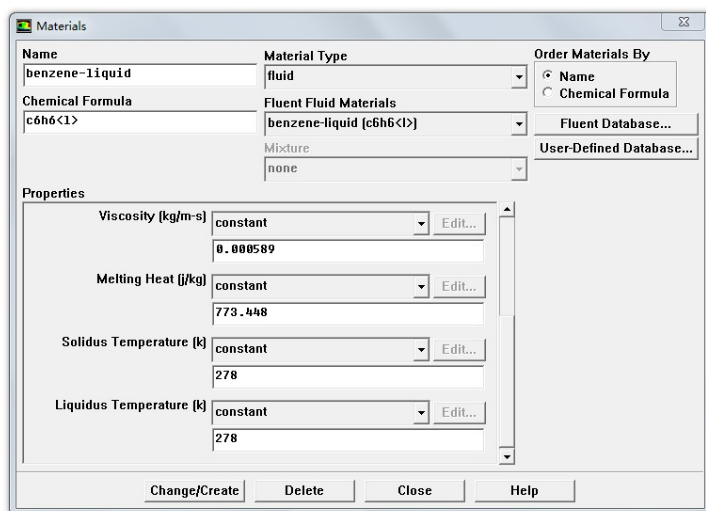


图 13-146　Materials 对话框

08 执行 Define→Operating Conditions…命令，沿 Z 轴方向加速度填写为-9.8，如图 13-147 所示。单击 OK 按钮完成。

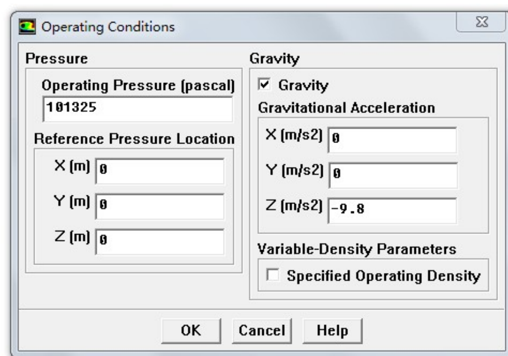


图 13-147　Operating Conditions 对话框

09 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。在列表中选择 fluid，在弹出的 fluid 面板中选择 Material 为 benzene-liquid，单击 OK 按钮。在列表中选择 bottom，其类型（Type）为 wall，单击 Set…按钮。选择 Temperature 输入 308，单击 OK 按钮。同理处理 side 和 top，只是将温度改为 237K。



10 执行 Solve→Control→Solution…命令，只选中 Engergy，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

11 执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 all-zones，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

12 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，energy 的收敛精度为 1e-08，单击 OK 按钮。

13 执行 Solve→Iterate…命令，设置 Number of Iteration 为 1000，单击 Iterate 按钮开始求解。

14 执行 Display→Contours 命令，在 Contours of 下拉列表框中选择 Temperature，不勾选 Filled，单击 Display 按钮，出现温度分布图，如图 13-148 所示。再在 Contours of 下拉列表框中改选 Solidification/Melting，单击 Display 按钮，显示出液态苯分布图，如图 13-149 所示。

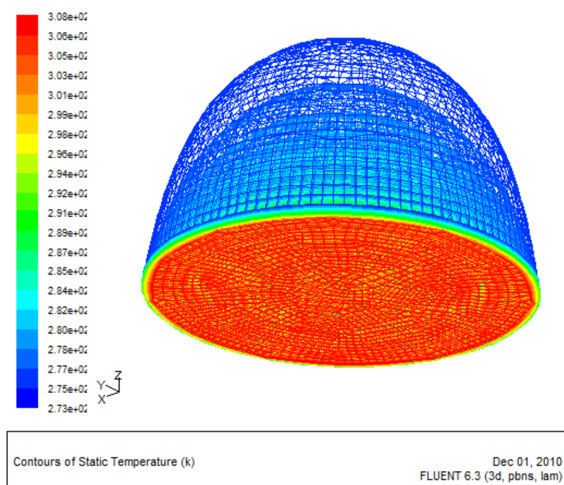


图 13-148　温度分布图

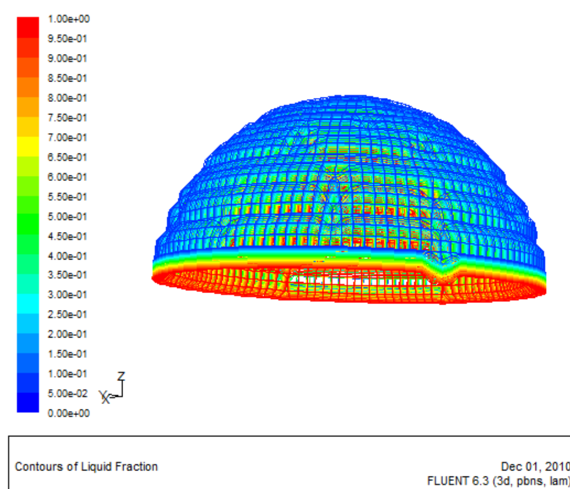


图 13-149　液态苯分布图

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

15 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model7.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model7.dat。

16 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

13.8 二维瞬间闸门倾泄流动模拟

1．实例概述

已知坝的上游水库水位为 10m，河道长 100m，坝的下游河道为干河，长度为 400m，现在启动闸门，水流迅速冲向下游，如图 13-150 所示。

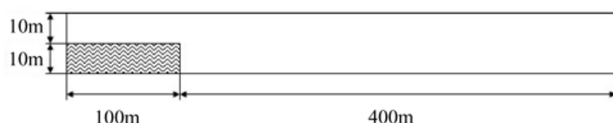


图 13-150　简单几何模型

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 建立矩形面域。单击 Geometry →Face →Create Real Rectangular Face，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 文本框和 Height 文本框中输入数值 500 和 20，单击 Apply 按钮生成大的矩形面。然后输入 100 和 10，生成小的矩形面。

03 单击 Geometry →Face →Move/Copy Faces，在 Move/Copy Faces 面板中选择小矩形面，在 X 和 Y 的文本框中输入-200 和-5，单击 Apply 按钮，即将小矩形面移动到大矩形面的左下角，如图 13-151 所示。



图 13-151　流道简图

04 对面域进行布尔操作。单击 Geometry →Face →Subtract Faces，在第一行 Face 文本框中选取大矩形面，第二行 Face 文本框中选取小矩形面，并选择 Retain 选项保留小矩形面，单击 Apply 按钮。

两个面交界的地方，有两条线段重合，可以单击 Edge 面板中的 Connect Edges 按钮，来使两条线段合并成一条。

3．网格的划分

01 单击 Mesh →Face →Mesh Faces，打开 Mesh Faces 面板，选中两个面，划分方式为 Quad、Map、Interval size-1，单击 Apply 按钮，完成对面网格的划分，如图 13-152 所示。



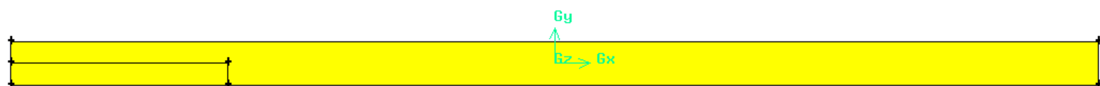


图 13-152　面网格的划分

02 单击 Zones →Specify Boundary Types ，在 Specify Boundary Types 面板中选择 Face.1 的上边界和右边界，类型为 PRESSURE_OUTLET，命名为 out；选择 Face.1 的左边界和下边界，类型为 WALL，命名为 w。

03 单击 Zones →Specify Continuum Types ，在 Specify Continuum Types 面板中选择小矩形面，类型为 FLUID，命名为 fluid 1。

04 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model8.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 3d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 Model8.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Define→Models→Solver…命令，弹出 Solver 对话框，选择 Unsteady 单选按钮，其他保持默认值，如图 13-153 所示。单击 OK 按钮完成。

04 执行 Define→Models→Multiphase…命令，弹出 Multiphase Model 对话框，选择 Volume of Fluid 单选按钮，保持默认值，如图 13-154 所示。单击 OK 按钮完成。

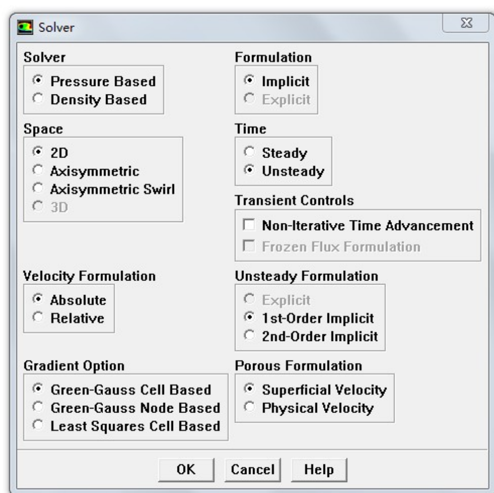


图 13-153　Solver 对话框

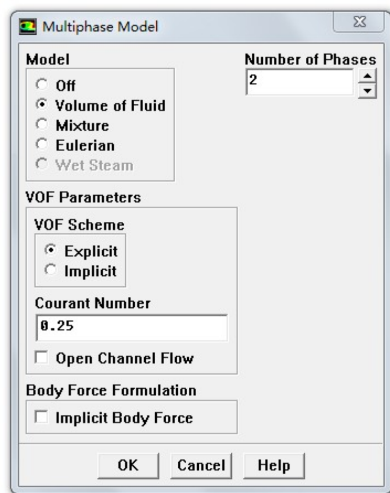


图 13-154　Multiphase Model 对话框

05 执行 Define→Materials 命令，单击 Fluent Database 按钮，在 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中选择 water-liquid[h2o<1>]，单击 Copy 按钮回到 Material 面板，单击 Change/Create 和 Close 按钮，完成对材料的定义。

06 执行 Define→Phases…命令，在 Phase 列表中选择 phase-1，在 Type 列表中选择 primary-phase，单击 Set…按钮。在打开的 Phase Material 对话框中选择 air，并在 Name 文本框中输入 air，单击 OK 按钮。同理，在 Phase 列表中选择 phase-2，单击 Set…按钮，在 Phase Material 对话框中选择 water-liquid，并在 Name 文本框中输入 water，单击 OK 按钮。

07 执行 Define→Operation Conditions…命令，沿 Y 轴方向加速度填写为−9.8，勾选 Specified Operating Density 复选框，如图 13−155 所示。单击 OK 按钮完成。

08 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。在列表中选择 out，phase 中选择 water，单击 Set…按钮，在 Pressure Outlet 对话框的 Multiphase 标签中，Backflow Volume Fraction 的文本框中输入 0，如图 13−156 所示。单击 OK 按钮完成。

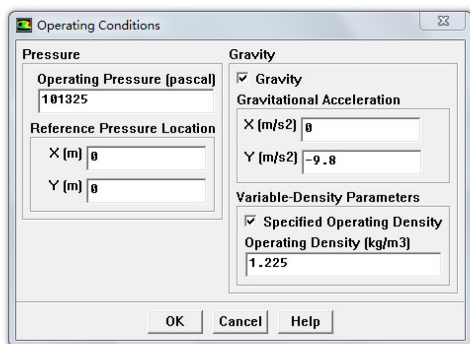


图 13−155 Operating Conditions 对话框

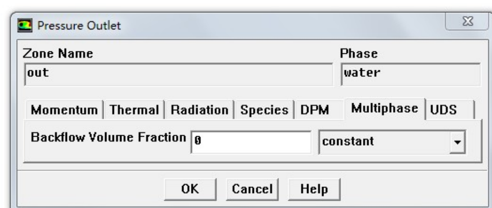


图 13−156 Pressure Outlet 对话框

09 执行 Solve→Control→Solution…命令，在 Pressure-Velocity Coupling 选项组中选择 PISO，其他保持默认值，如图 13−157 所示。单击 OK 按钮完成。

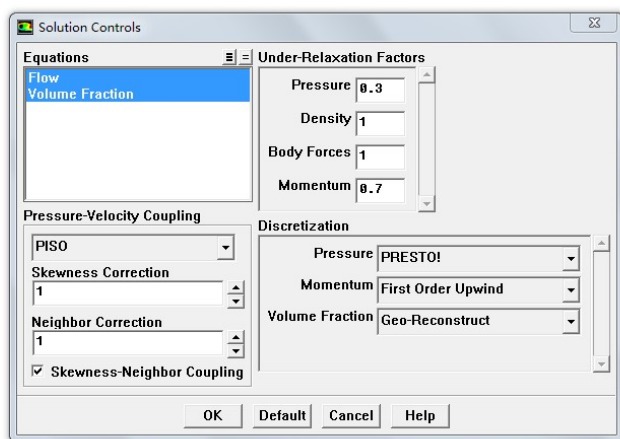


图 13−157 Solution Controls 对话框

10 执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 all-zones，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

11 执行 Solve→Initialize →Patch…命令，弹出如图 13−158 所示的 Patch 对话框。在



Phase 下拉列表框中选择 water，选中 Volume Fraction 和 Fluid 1，在 Value 文本框中填写 1，单击 Patch 按钮。

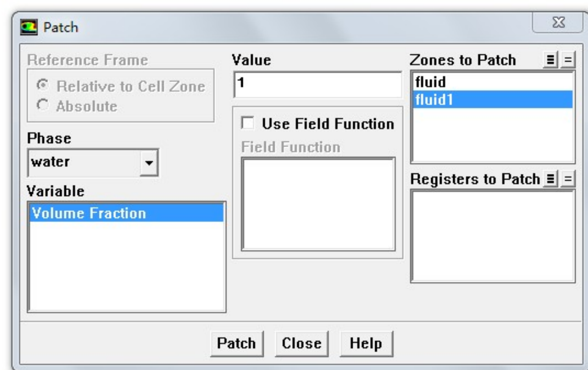


图 13-158　Patch 对话框

12 执行 Display→Contours 命令，在 Contours of 中选择 Phase…和 Volume Fraction，并在 Phase 中选择 air，勾选 Filled，单击 Display 按钮，显示了初始时态的空气体积分数，如图 13-159 所示。

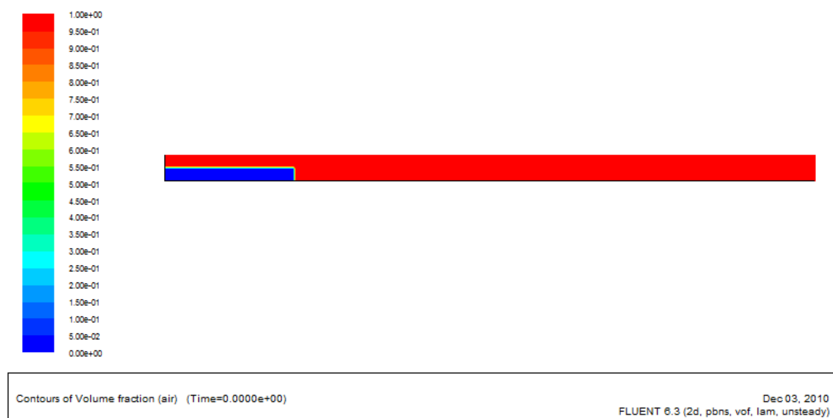


图 13-159　初始时态的空气体积分数

13 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

14 执行 Solve→Iterate…命令，设置 Time Step Size 为 0.01s，Number of Time Steps 为 50，其他保持默认值，单击 Iterate 按钮开始求解。

15 执行 Display→Contours 命令，在 Contours of 中选择 Phase，勾选 Filled，单击 Display 按钮，出现空气 0.5s 时的体积分数分布云图，如图 13-160 所示。再执行 Display→Vectors…命令，单击 Display 按钮，显示出空气 0.5s 时的速度矢量图，如图 13-161 所示。



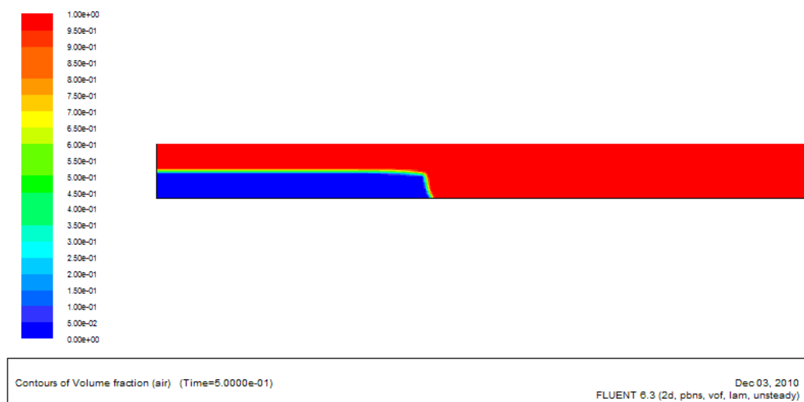


图 13-160　空气 0.5s 时的体积分数分布云图

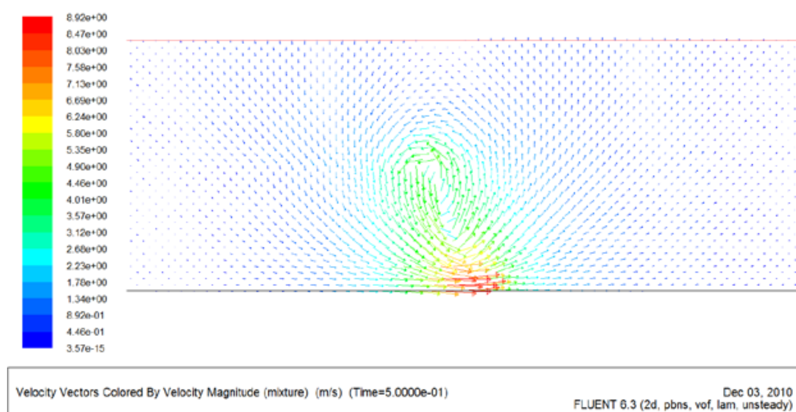


图 13-161　空气 0.5s 时的速度矢量图

16 同理，将 Number of Time Steps 改为 90 和 120，考察空气 0.9s 和 1.2s 时的体积分数分布云图和速度矢量图，如图 13-162～图 13-165 所示。

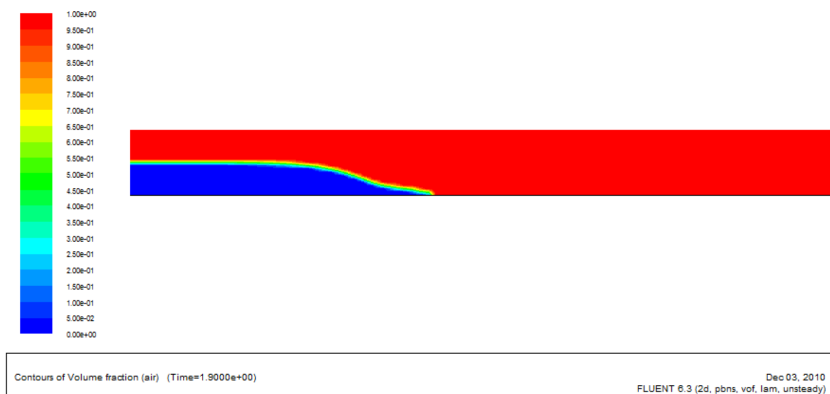


图 13-162　空气 0.9s 时的体积分数分布云图



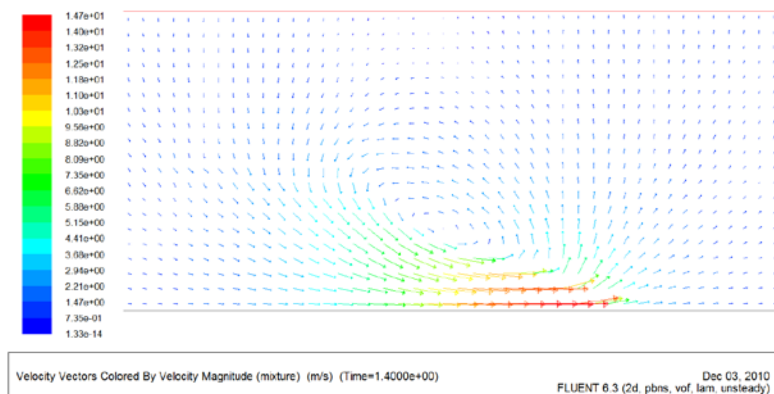


图 13-163　空气 0.9s 时的速度矢量图

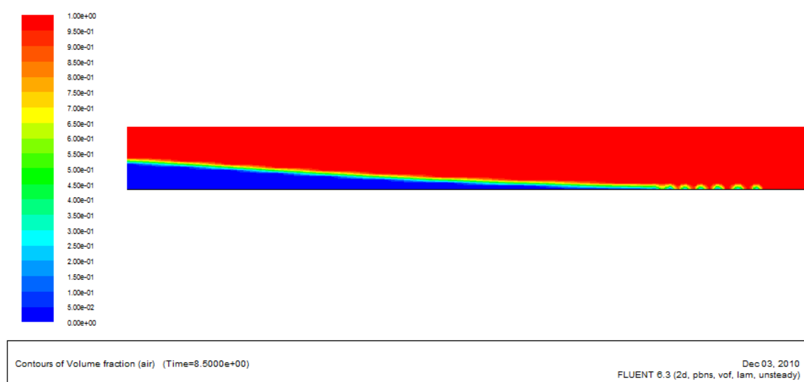


图 13-164　空气 1.2s 时的体积分数分布云图

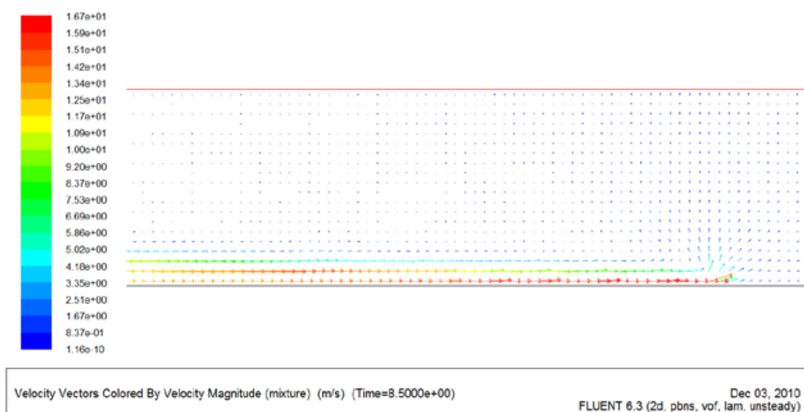


图 13-165　空气 1.2s 时的速度矢量图

17 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model8.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model8.dat。

18 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

13.9 水浴加热保温流场模拟

1．实例概述

在日常生活中，有时候要用到水浴加热，如鱼缸保温、水浴锅等，通常都是在容器底部安装加热盘管。本例假设一个实验室常用的水浴锅，在室温（25℃）的情况下加热，用 FLUENT 6.3 模拟加热以及保温过程中流体温度的变化，其几何模型如图 13-166 所示。

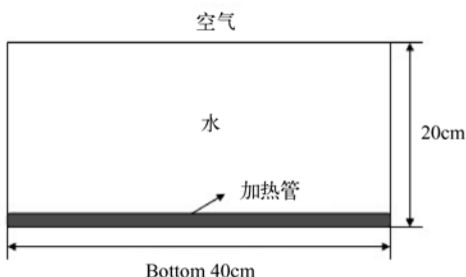


图 13-166　几何模型

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 建立矩形面域。单击 Geometry →Face →Create Real Rectangular Face ，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 文本框和 Height 文本框中输入数值 0.4 和 0.2，单击 Apply 按钮生成矩形面。

3．网格的划分

01 单击 Mesh →Edge →Mesh Edges ，在如图 13-167 所示的 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色文本框中选择矩形左右两边的线段，选择 Double sided 复选框，设置 Ratio1 和 Ratio2 都为 1.05，选择 Interval Count 的分段方式，并分割为 35 段。同理，设置矩形上下两条线段，分割成 40 段。

02 单击 Mesh →Face →Mesh Faces ，打开 Mesh Faces 面板，选中矩形面，其他保持默认值，生成面网格，如图 13-168 所示。

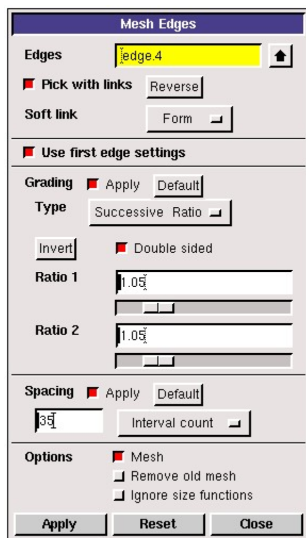


图 13-167　Mesh Edges 面板

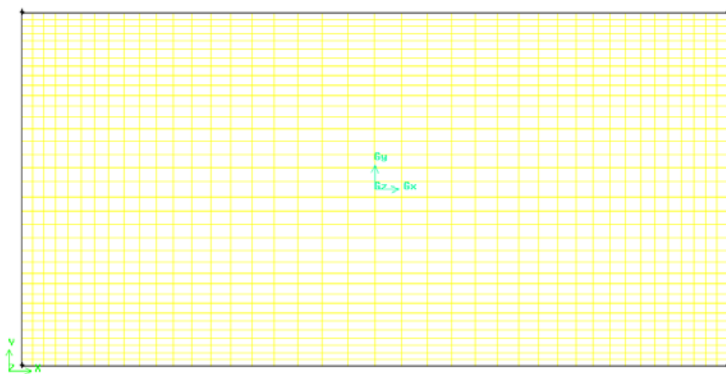


图 13-168　面网格的划分



03 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中将矩形的 4 个边都定为 WALL 的类型，分别命名为 bottom、top、right、left。

04 单击 Zones→Specify Continuum Types，在 Specify Continuum Types 面板中选择矩形面，类型为 FLUID，命名为 water。

05 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model9.msh，并选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为二维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 2d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 Model9.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令。

03 执行 Define→Models→Solver…命令，弹出 Solver 对话框，选择 Unsteady，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

04 执行 Define→Models→Energy，弹出 Energy 对话框，启动能量方程，单击 OK 按钮。

05 执行 Define→Materials 命令，单击 Fluent Database 按钮，在 Fluent Fluid Materials 下拉列表框中选择 water-liquid[h2o<1>]，单击 Copy 按钮回到 Material 面板，单击 Change/Create 和 Close 按钮，完成对材料的定义

06 执行 Define→Operating Conditions…命令，沿 Y 轴方向加速度填写为−9.8，单击 OK 按钮。

07 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框。在列表中选择 water，单击 Set…按钮，在 Fluid 面板的 Material Name 列表中选择 water-liquid，单击 OK 按钮。回到 Boundary Conditions 对话框，在列表中选择 left、right 和 top，分别设定温度为 298K。选择 bottom，设定加热温度为 473K。

08 执行 Solve→Control→Solution…命令，在 Discretization 选项组的 Pressure 下拉列表框中选择 PRESTO!，其他保持默认值，单击 OK 按钮，如图 13−169 所示。

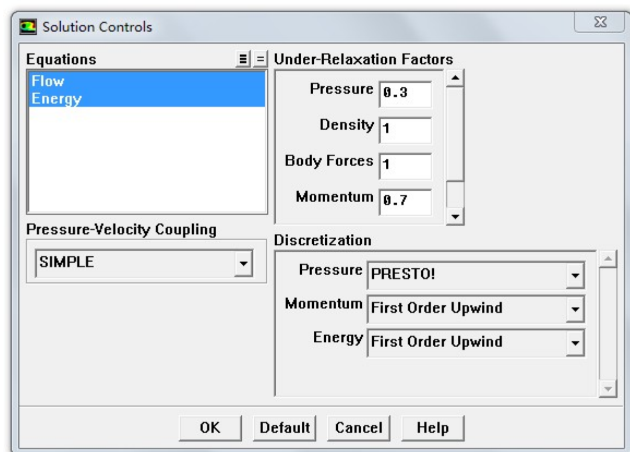


图 13−169 Solution Controls 对话框

09 执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 all-zones，设置 Temperature 为 323K，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

10 执行 Solve→Initialize→Patch…命令，在 Patch 对话框的 Variable 列表中选择 Temperature，Zone to Patch 列表中选择 water，在 Value 文本框中输入 323K，单击 Patch 按钮，设置整个容器的温度为 323K，如图 13-170 所示。

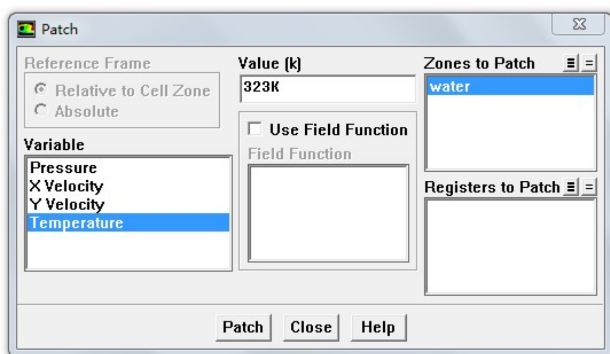


图 13-170　Patch 对话框

11 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

12 执行 Solve→Iterate…命令，设置 Time Step Size 为 0.1s，Number of Time Steps 为 3000，其他保持默认值，单击 Iterate 按钮开始求解。

13 迭代完成后，执行 Display→Contours…命令，在 Contours 对话框的 Contours of 下拉列表框中选择 Temperature 和 Static Temperature，勾选 Filled，单击 Display 按钮，生成 5min 后的温度分布云图，如图 13-171 所示。

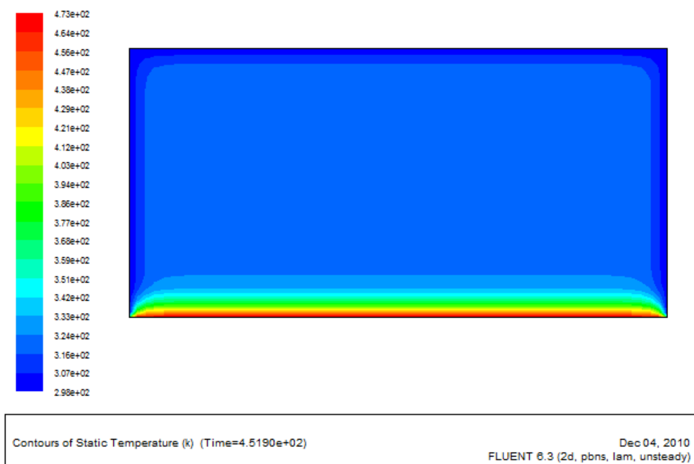


图 13-171　5min 后的温度分布云图

14 在 Contours of 下拉列表框中改选 Velocity 和 Velocity Magnitude，单击 Display 按钮，得到水浴锅内的速度分布云图，如图 13-172 所示。



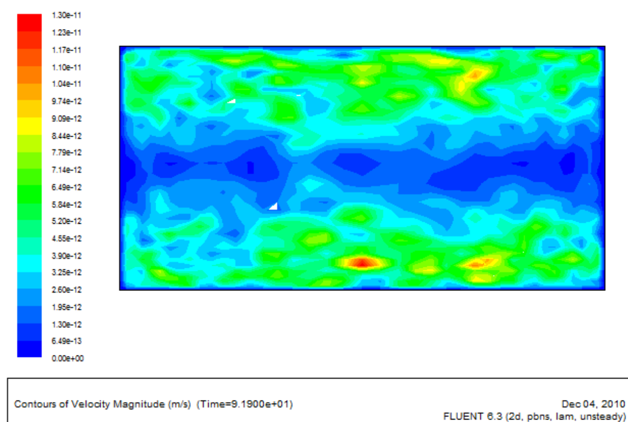


图 13-172　5min 后的速度分布云图

15 继续迭代 30min 后，得到温度分布云图和速度分布云图，如图 13-173 和图 13-174 所示。此时可以看出对流现象非常明显。

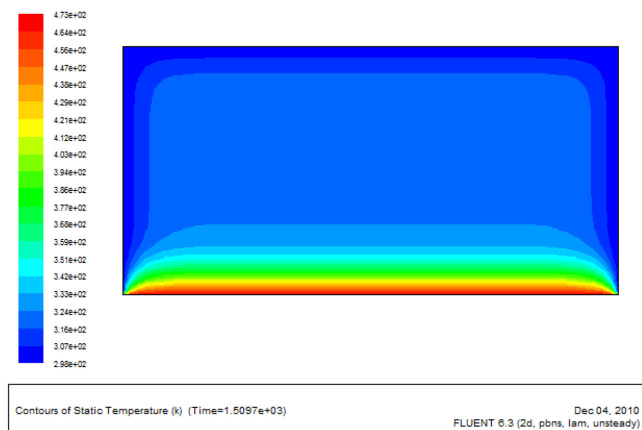


图 13-173　30min 后的温度分布云图

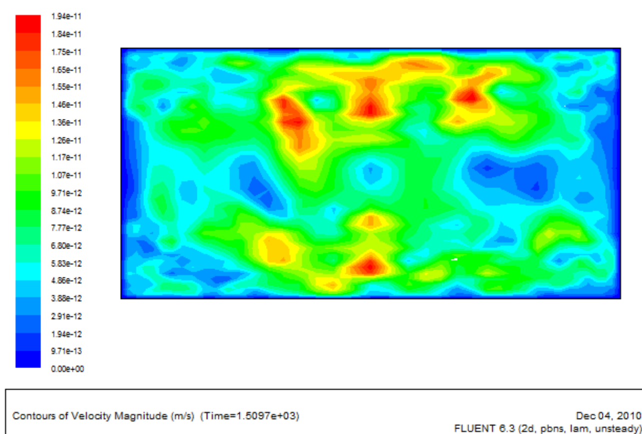


图 13-174　30min 后的速度分布云图

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章
FLUENT 6.3
综合应用实例

16 继续迭代直到容器温度达到指定温度，然后停止计算，执行 File→Write→Data…命令，将文件保存为 Model9-1.dat。

17 当水浴锅内温度达到 325K 时，停止加热。容器底部温度为周围环境温度 298K，水浴锅内温度开始下降。需要对初始条件进行重新定义。

❶执行 Define→Boundary Conditions…命令，选择 bottom，设定加热温度为 298K。

❷执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 all-zones，设置 Temperature 为 325K，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

❸执行 Solve→Initialize→Patch…命令，在 Patch 对话框的 Variable 列表中选择 Temperature，Zone to Patch 列表中选择 water，在 Value 列表中输入 325K，单击 Patch 按钮，设置整个容器的温度为 325K。

设置完以后按照前面的处理过程进行迭代，5min 后容器内流体的温度分布云图和速度分布云图如图 13-175 和图 13-176 所示。

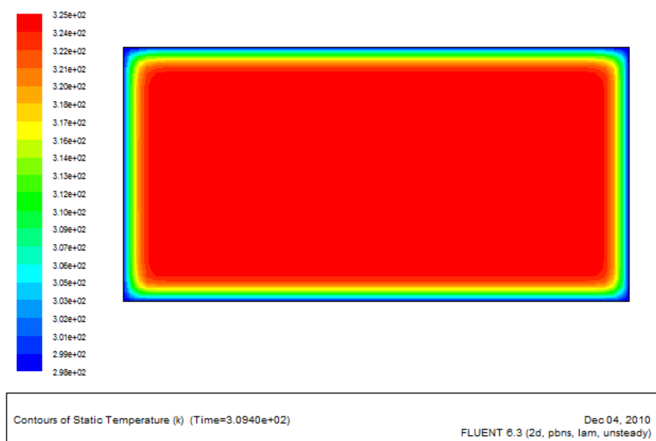


图 13-175　5min 后的温度分布云图

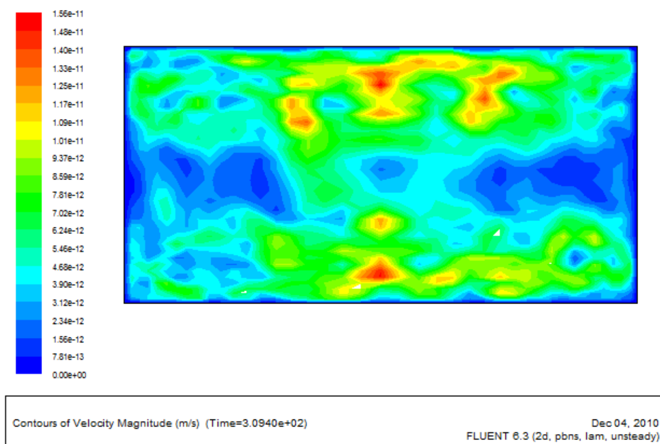


图 13-176　5min 后的速度分布云图

30min 后容器内流体的温度分布云图和速度分布云图如图 13−177 和图 13−178 所示。

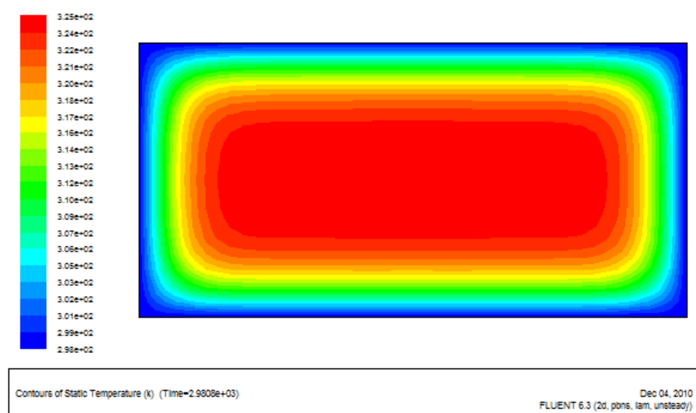


图 13−177　30min 后的温度分布云图

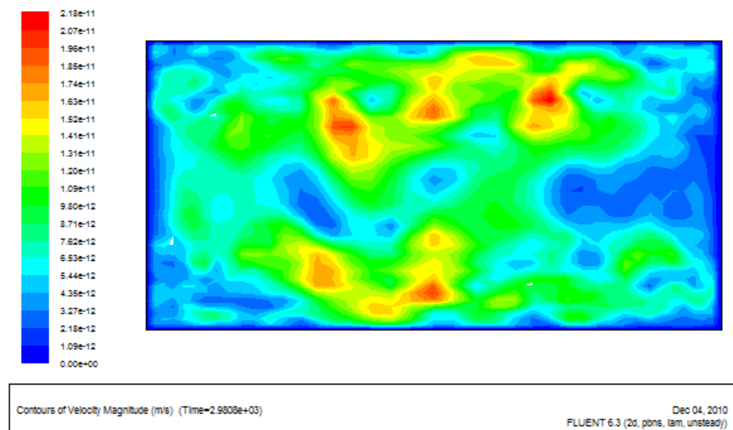


图 13−178　30min 后的速度分布云图

18 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model9-2.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model9-2.dat。

19 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3。

13.10　三维流−固耦合散热模拟

1．实例概述

在一个环形板上安装上电子芯片，在本例中模拟成一个长方体。空气以 0.5m/s 的速度从模型的一端进入，从另一端流出。模型外部温度保持在 298K，具体参数如图 13−179 所示。现在用 FLUENT 6.3 来模拟流−固耦合散热问题。

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248
第 13 章 FLUENT 6.3 综合应用实例

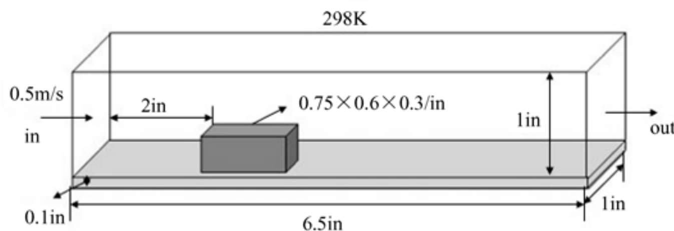


图 13-179 实例模型

2．模型的建立

01 启动 GAMBIT，选择工作目录 D:\Gambit working。

02 单击 Geometry →Volume →Create Real Brick ，在 Create Real Brick 面板的 Drection 列表中选择+X+Y+Z，在 Width(X)文本框、Depth(Y)文本框、Height(Z)文本框中分别输入 6.5、1.1、0.5，单击 Apply 按钮，得到六面体，如图 13-180 所示。

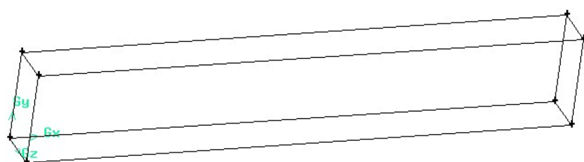


图 13-180 简单几何模型

03 建立分割体的面。单击 Geometry →Face →Create Real Rectangular Face ，在 Create Real Rectangular Face 面板的 Width 文本框和 Height 文本框中输入数值 4 和 20，选择 ZX Centered，单击 Apply 按钮，生成分割面，如图 13-181 所示。

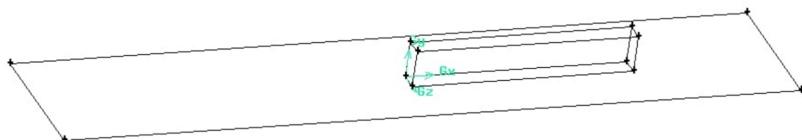


图 13-181 分割体面的建立

04 移动创建的面。单击 Geometry →Face →Move/Copy Faces ，在 Move/Copy Faces 面板中选择刚创建的分割面，在 Y 的文本框中输入 0.1，单击 Apply 按钮。

05 用平移后的 plane 对 volume 1 进行分割。单击 Geometry →Volume →Split Volume ，弹出 Split Volume 面板。在 Volume 文本框中选择 Volume.1，在 Split With 选项中选择新建的分割面，如图 13-182 所示。单击 Apply 按钮，生成两个体 Volume.2 和 Volume.1。

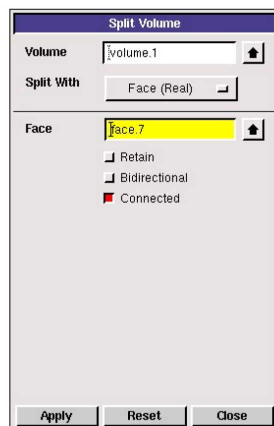


图 13-182 Split Volume 面板

06 创建电子芯片。单击 Geometry →Volume →Create Real Brick ，在 Create Real Brick 面板的 Drection 列表中选择+X+Y+Z，在 Width(X)文本框、



Depth(Y)文本框、Height(Z)文本框中分别输入 0.75、0.3、0.3，单击 Apply 按钮，得到长方体的电子芯片模型 Volume.3。

07 移动电子芯片模型。单击 Geometry→Face→Move/Copy Faces，在 Move/Copy Faces 面板中选择刚创建的体 Volume.3，在 X 和 Y 的文本框中输入 2 和 0.1，单击 Apply 按钮，生成几何模型外形体，如图 13−183 所示。

08 分割体得到流体区域。单击 Geometry→Volume→Split Volume，弹出 Split Volume 面板。在 Volume 文本框中选择 Volume.2，在 Split With 选项中选择 Volume.3，单击 Apply 按钮，完成体对体的分割。

3．网格的划分

01 单击 Mesh→Edge→Mesh Edges，在 Mesh Edges 面板的 Edges 黄色文本框中选择电子芯片沿 X 轴方向的边，分成 15 段；沿 Y 轴方向的边分成 7 段；沿 Z 轴方向的边分成 4 段。然后选择 Volume.1 沿 X 轴方向的边，分成 100 段，沿 Y 轴方向的边分成 4 段，沿 Z 轴方向的边分成 8 段。同理，对 Volume.2 的各边进行分段，沿 X 轴方向上分成 100 段，沿 Y 轴方向上分成 16 段，沿 Z 轴方向上分成 8 段。

02 单击 Mesh→Volume→Mesh Volumes，打开 Mesh Volumes 面板，选择所有的体，保持默认值，单击 Apply 按钮，完成对几何体体网格的划分，如图 13−184 所示。

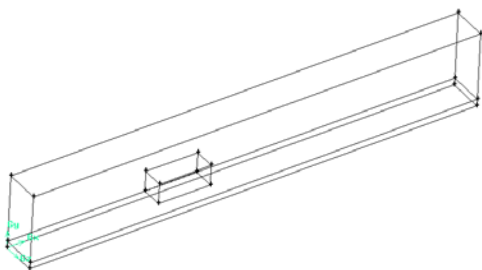


图 13−183　几何模型外形体

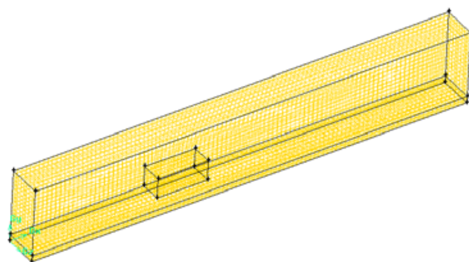


图 13−184　几何体体网格的划分

03 单击 Zones→Specify Boundary Types，在 Specify Boundary Types 面板中选择流体区域（Volume.2）左边壁面，定义为 VELOCITY_INLET，命名为 in，选择右边壁面，定义为 PRESSURE_OUTLET，命名为 out；选择顶面，定义为 WALL，命名为 wall；选择后壁面，定义为 symmetry，命名为 Fluid-sym；选择前壁面，定义为 symmetry，命名为 Sym-2。选择环形板（Volume.1）左右两边壁面，定义为 WALL，命名为 Board-side-wall；选择前壁面，定义为 symmetry，命名为 Sym-1；选择后壁面，定义为 symmetry，命名为 Board-sym；选择顶面，定义为 WALL，命名为 Board-top-wall；选择下底面，定义为 WALL，命名为 Board-bottom-wall。然后选择电子芯片模型（Volume.3）下底面，定义为 WALL，命名为 Chip-bottom-wall，选择后壁面，定义为 symmetry，命名为 Chip-sym，选择其他 4 个壁面，定义为 WALL，命名为 Chip-side-wall。

04 单击 Zones→Specify Continuum Types，在 Specify Continuum Types 面板中选择流体区域（Volume.2），定义为 FLIUD，命名为 fluid；选择电子芯片模型（Volume.3），定义为 SOLID，命名为 Chip-solid；选择环形木板（Volume.1），定义为

SOLID，命名为 Board-solid。

05 执行 File→Export→Mesh 命令，在文件名中输入 Model10.msh，不选择 Export 2-D（X-Y）Mesh，确定输出的为三维模型网络文件。

4．求解计算

01 启动 FLUENT 6.3，在弹出的 FLUENT Version 对话框中选择 3d 计算器，单击 Run 按钮。

02 执行 File→Read→Case…命令，读入划分好的网格文件 Model10.msh。然后进行检查，执行 Grid→Check 命令，确定最小网格大于 0。

03 执行 Grid→Scale…命令，在如图 13-185 所示的 Scale Grid 对话框的 Unit Conversion 中选择 in，单击 Scale 按钮。

04 执行 Define→Models→Solver…命令，保持默认值，单击 OK 按钮。

05 执行 Define→Models→Energy，弹出 Energy 对话框，启动能量方程，单击 OK 按钮。

06 执行 Define→Models→Viscous…命令，在对话框中选择 Laminar，单击 OK 按钮。

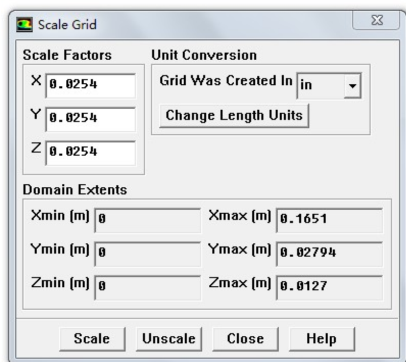


图 13-185　Scale Grid 对话框

07 执行 Define→Materials 命令，在如图 13-186 所示的 Materials 对话框中 Material Type 下拉列表框中选择 solid，在 Name 文本框中输入 board，删除 Chemical Formula 文本框中的内容，将 Thermal Conductivity 设置为 0.1；单击 Change/Create 按钮，在弹出的如图 13-187 所示的对话框中单击 No 按钮。同理，按照图 13-188 参数创建材料 Chip。

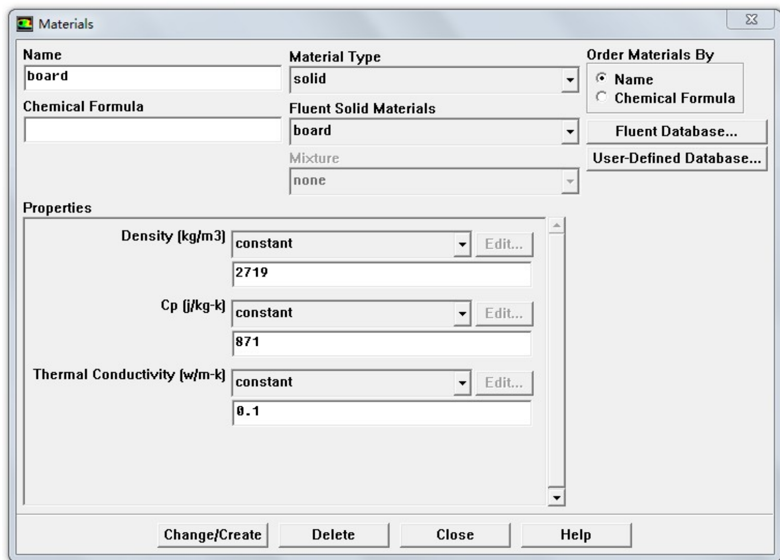


图 13-186　Board 材料参数的设置



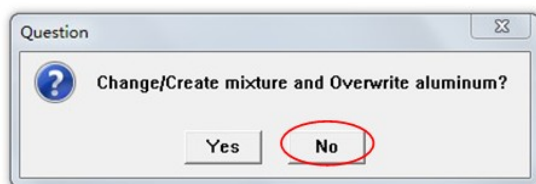


图 13-187　对话框

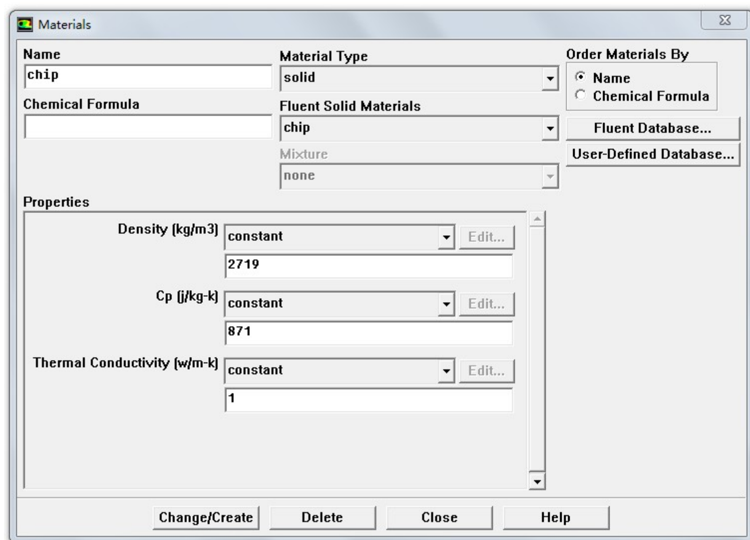


图 13-188　Chip 材料参数的设置

08 执行 Define→Boundary Conditions…命令，弹出 Boundary Conditions 对话框，在 Zone 列表中选择 fluid，单击 Set…按钮。在弹出的 Fluid 面板中选择 Material Name 下拉列表框为 air。回到 Boundary Conditions 面板中，在 Zone 列表中选择 board-solid，单击 Set…按钮，在弹出的 Solid 面板中选择 Material Name 下拉列表框为 board，如图 13-189 所示。

09 同理，指定 chip-solid 的材料类型。在弹出的 Solid 面板中勾选 Source Terms 复选框，如图 13-190 所示。在 Source Terms 标签中 Energy 后面，单击 Edit 按钮，进入如图 13-191 所示的 Energy Source 面板。将数值设为 1，从下拉列表框中选择 constant，然后将前面数值设定为 904000，然后单击 OK 按钮。

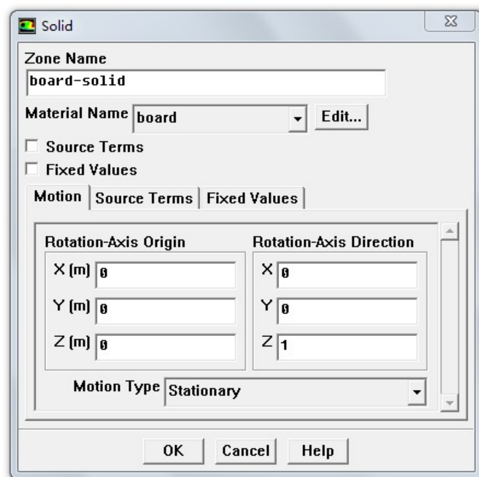


图 13-189　Solid 面板中 Board 材料类型设置

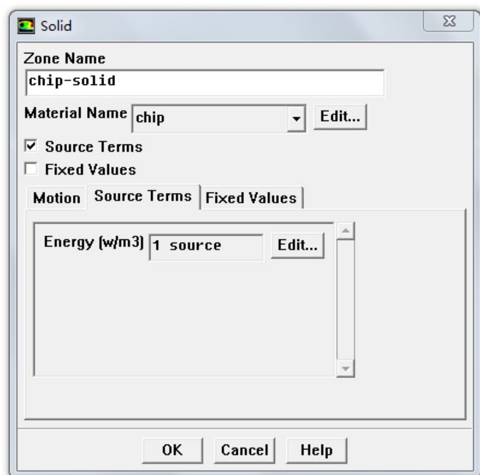


图 13-190　Solid 面板中 Chip 材料类型设置

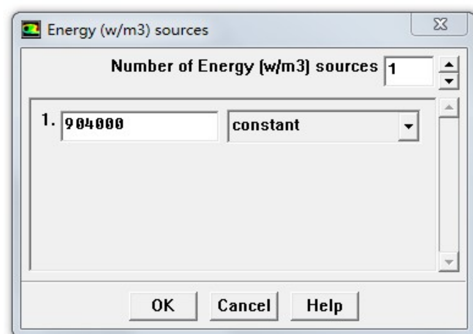


图 13-191　Energy Sources 面板

10 回到 Boundary Conditions 面板，在 Zone 列表框中选择 in，单击 Set…按钮。进入到如图 13-192 所示的 Velocity Inlet 对话框中，在 Velocity Specification Method 下拉列表框中选择 Magnitude and Direction；在 Velocity Magnitude 文本框中输入 0.5，在 x-Component of Flow Direction 文本框输入 1，其他方向保持为 0，表示 air 沿 X 方向以 0.5m/s 的速度流动。选择 Thermal 标签将 Temperature 设定为 298K。

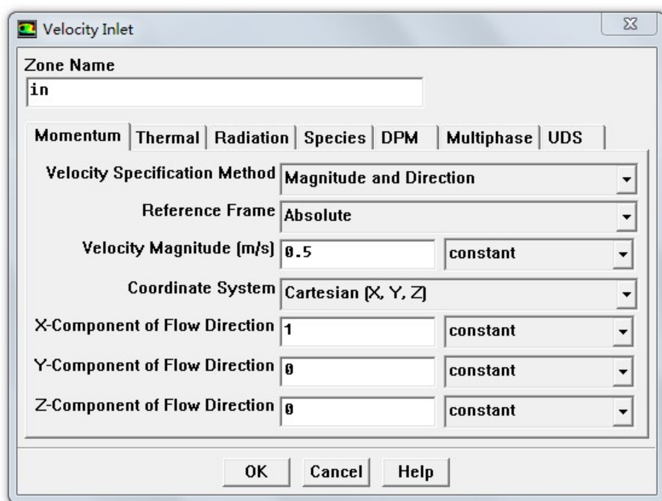


图 13-192　Velocity Inlet 对话框

11 回到 Boundary Conditions 面板，在 Zone 列表框中选择 out，单击 Set…按钮。进入到 Pressure Outlet 对话框中，将 Temperature 设定为 298K，其他保持默认值，单击 OK 按钮。

12 回到 Boundary Conditions 面板，在 Zone 列表框中选择 wall，单击 Set…按钮。进



入 wall 对话框，选择 Thermal 标签，在 Thermal Conditions 选框中选择 Convection 单选按钮，设置 Heat Transfer Coefficient 为 1.5，Free Stream Temperature 为 298，如图 13-193 所示。单击 OK 按钮完成。同理，设置 board-bottom-wall，注意要把 Material Name 下拉列表框改为 board。

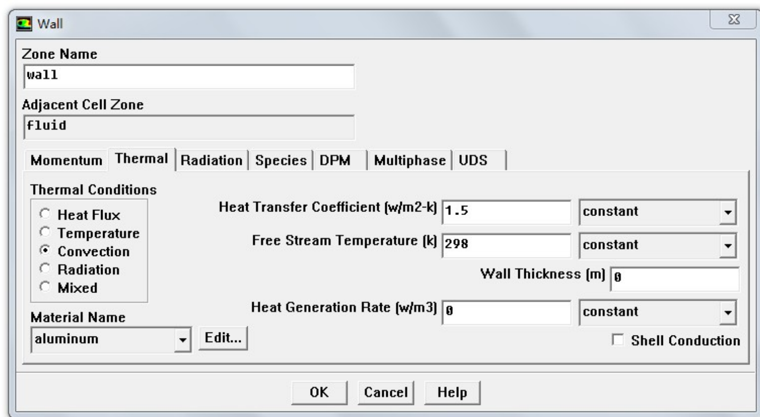


图 13-193　Wall 对话框

13 回到 Boundary Conditions 面板，在 Zone 列表框中选择 chip-bottom-wall，单击 Set…按钮。进入 Wall 对话框，选择 Thermal 标签，在 Thermal Conditions 下选择 Coupled 单选按钮，将 Material Name 下拉列表框选择为 chip，如图 13-194 所示。单击 OK 按钮完成。同理，对 chip-side-wall 和 board-top-wall 进行设置，Material Name 下拉列表框需要改为 chip 和 board。

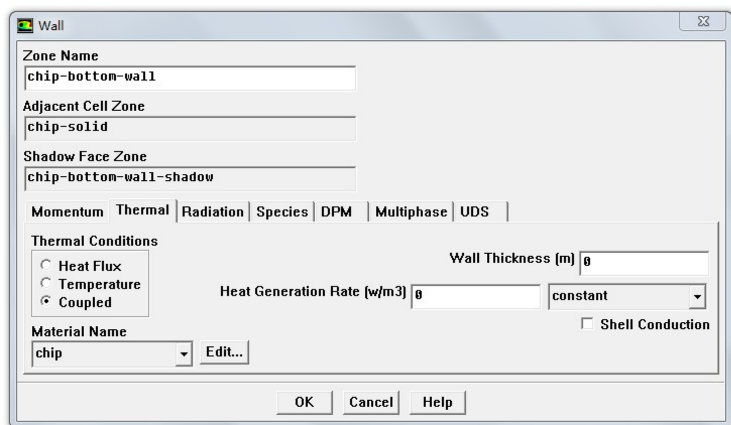


图 13-194　chip-bottom-wall 参数设置

14 回到 Boundary Conditions 面板，在 Zone 列表框中选择 board-side-wall，单击 Set…按钮。进入 wall 对话框，选择 Thermal 标签，在 Thermal Conditions 下选择 Heat Flux 单选按钮，将 Material Name 下拉列表框选择为 board，如图 13-195 所示。单击 OK 按钮完成。

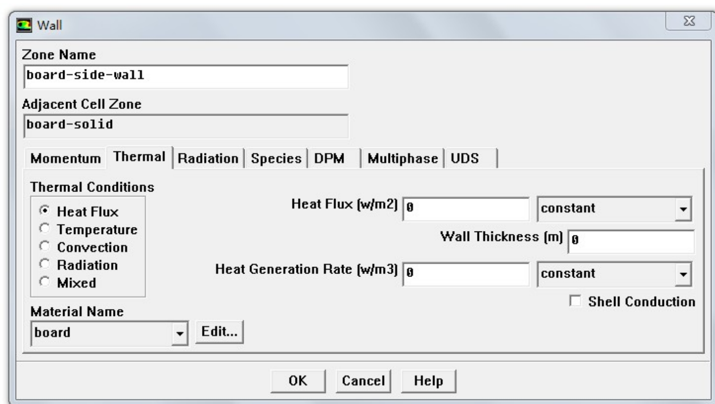


图 13-195　board-side-wall 参数设置

15 执行 Solve→Control→Solution…命令，弹出 Solution Controls 对话框，保持默认值，单击 OK 按钮。

16 执行 Solve→Initialize→Initialize…命令，在弹出的 Solution Initialize 对话框中选择 in，顺序单击 Init、Apply、Close 按钮。

17 执行 Solve→Monitors→Residual…命令，在 Residual Monitors 对话框中选中 Plot，单击 OK 按钮。

18 执行 Solve→Iterate…命令，设置 Number of Iteration 为 100，单击 Iterate 按钮开始求解。

19 迭代完成后，执行 Display→Contours 命令，在 Contours of 下拉列表框中选择 Temperature 和 StaticTemperature，勾选 Filled，在 Surface 下选择 Board 相关界面，即出现环形木板的温度分布云图，如图 13-196 所示。再选择 Chip 相关界面，即出现电子芯片周围的温度分布云图，如图 13-197 所示。

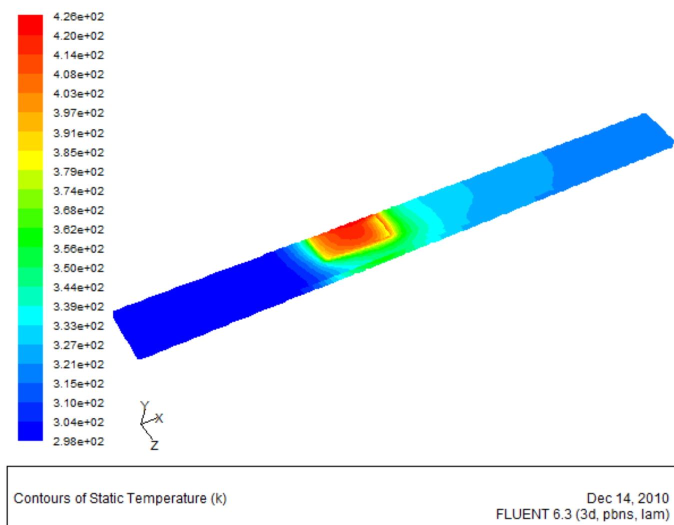


图 13-196　环形木板的温度分布云图



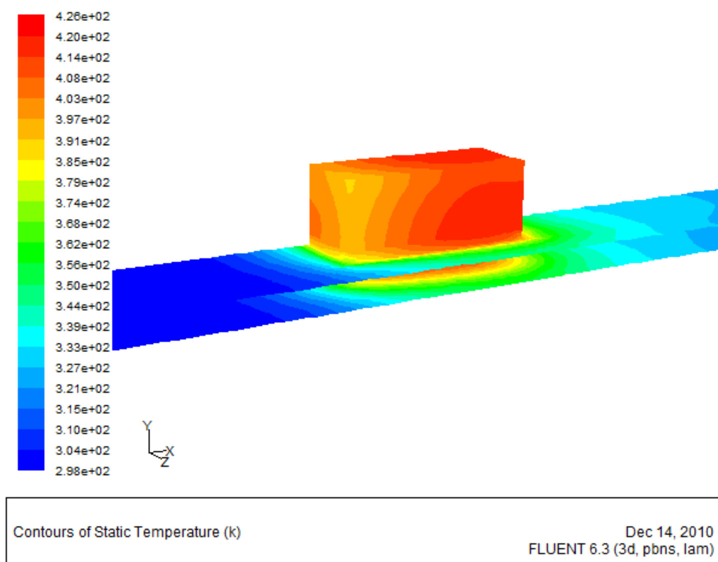


图 13-197　电子芯片周围的温度分布云图

20 执行 Surface→Iso-Surface…命令，弹出 Iso-Surface 对话框，在 Surface of constant 下拉列表框中选择 Grid，选择 Y-Coordinate；单击 Compute 按钮将会显示 Y 的最小值和最大值；在 Iso-Values 下输入 0.006，命名为 y-0.006，如图 13-198 所示。单击 Create 按钮创建平面。

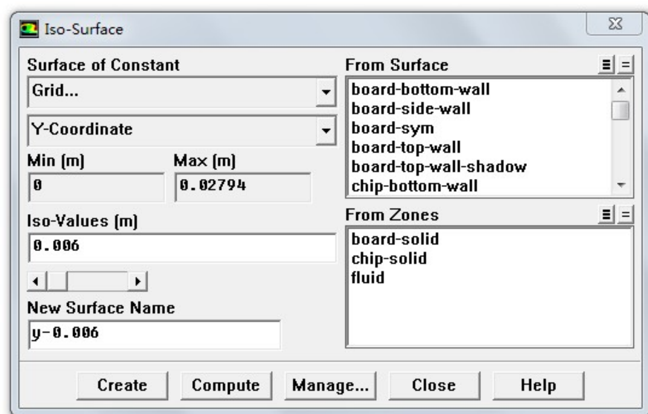


图 13-198　Iso-Surface 对话框

21 执行 Dispaly→Vectors…命令，在如图 13-199 所示的 Vectors 对话框中选择 Surface：y-0.006，在 Scale 文本框中输入 4，勾选 Draw Grid，弹出如图 13-200 所示的 Grid Display 对话框。在 Options 中选择 Faces，去掉 Edges，在 Surfaces 列表框中选择 board-top-wall 和 chip-side-wall。单击 Colors…按钮，弹出如图 13-201 所示的 Grid Colors 对话框可以对网格颜色进行变化，在 Types 列表框中选择 wall，在 colors 列表中选择 blue，单击 Rest Colors 按钮，完成对颜色的定义。

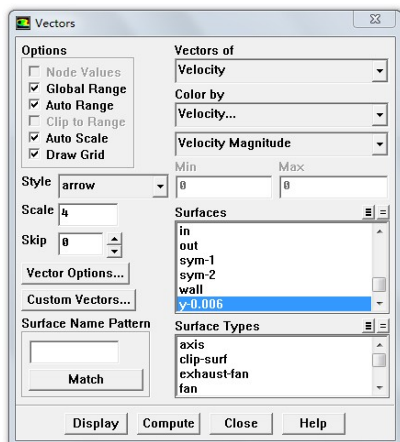


图 13-199　Vectors 对话框

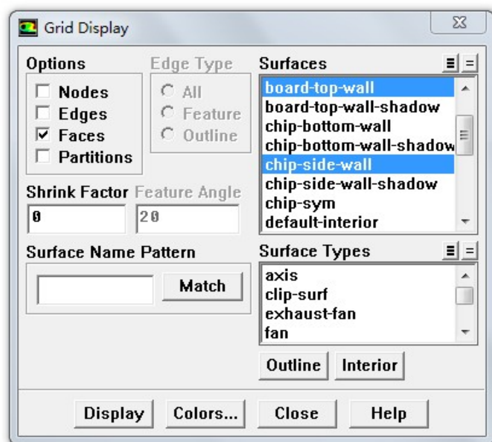


图 13-200　Grid Display 对话框

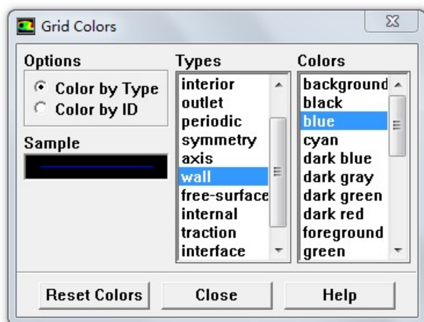


图 13-201　Grid Colors 对话框

单击 Vectors 对话框中的 Display 按钮，即出现截面的速度矢量图，如图 13-202 所示。

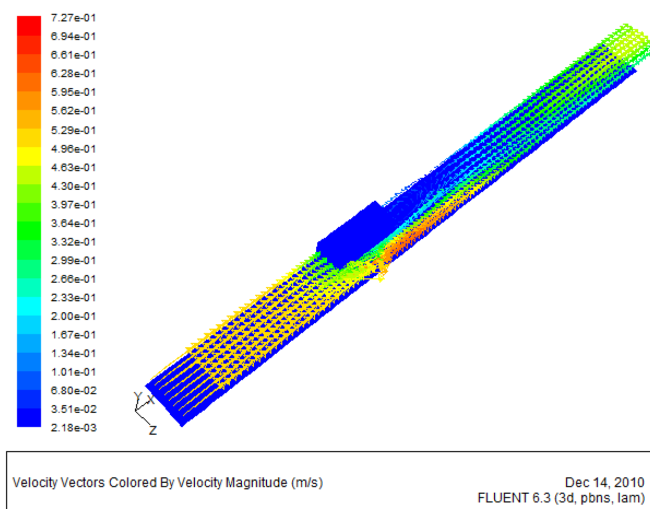


图 13-202　截面的速度矢量图



22 执行 Display→View…命令，弹出如图 13-203 所示的 Views 对话框，在 Mirror Planes 列表中选择 chip-sym，单击 Apply 按钮，就能看到镜像图，如图 13-204 所示。

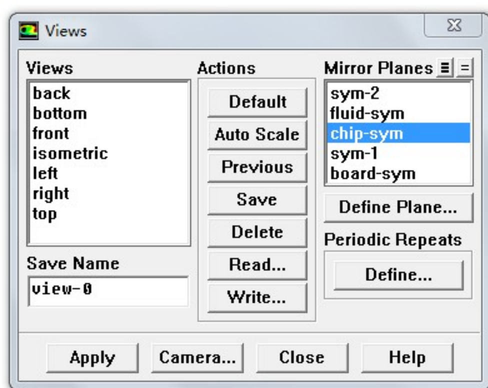


图 13-203 Views 对话框

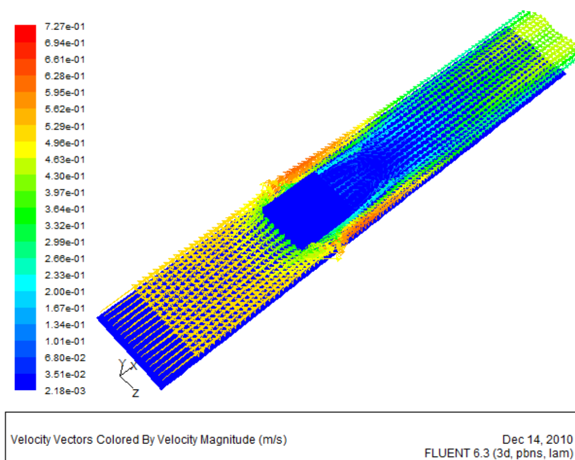


图 13-204 镜像图

23 执行 Display→Options…命令，弹出如图 13-205 所示的 Display Options 对话框，勾选 Lights On，单击 Apply 按钮，即得到最后模型图，如图 13-206 所示。

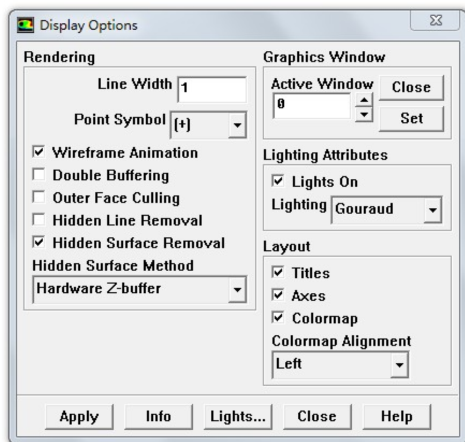


图 13-205 Display Options 对话框

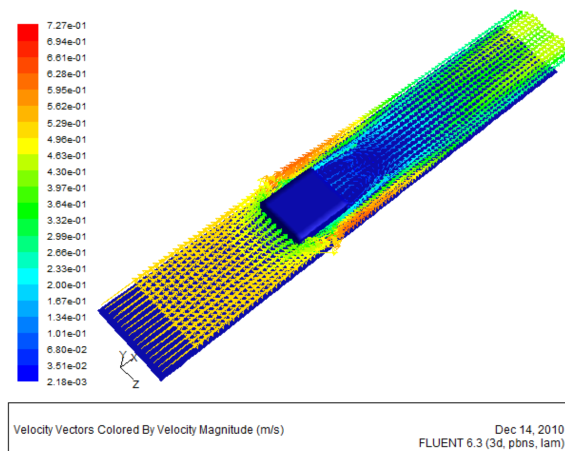


图 13-206 几何模型图

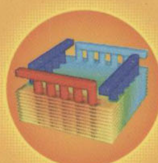
24 计算完的结果要保存为 case 和 data 文件，执行 File→Write→Case&Data…命令，在弹出的文件保存对话框中将结果文件命名为 Model10.cas，case 文件保存的同时也保存了 data 文件 Model10.dat。

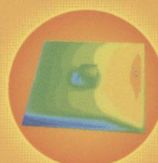
25 最后执行 File→Exit 命令，退出 FLUENT 6.3

1 P1
2 P16
3 P34
4 P72
5 P105
6 P132
7 P164
8 P180
9 P196
10 P204
11 P224
12 P248

ISBN 978-7-111-36022-3
策　　划：吴鸣飞
封面设计：子时文化 ZiShi Culture

FLUENT 6.3 流场分析 从入门到精通



SolidWorks系列
AutoCAD系列
Pro/E系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

ANSYS系列已出版

- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析

上架建议：计算机/辅助设计



地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服中心：(010)88361066
销售一部：(010)68326294
销售二部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203
邮政编码：100037
网络服务
门户网：http:www.cmpbook.com
教材网：http:www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

定价：59.00元（含1DVD）